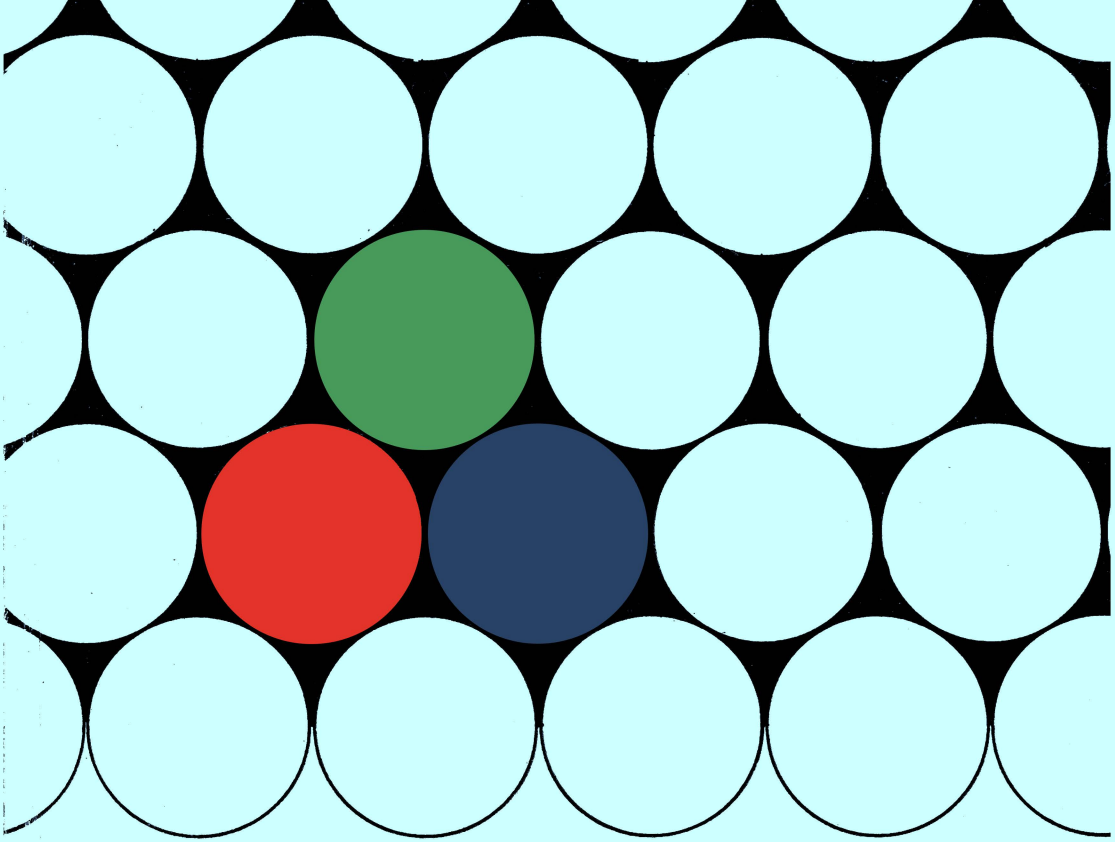


W. A. HOLM

LA TELEVISION EN COULEURS

SANS MATHEMATIQUES

TROISIEME EDITION

BIBLIOTHEQUE TECHNIQUE PHILIPS

DUNOD

LA TELEVISION EN COULEURS
SANS MATHEMATIQUES

W. A. HOLM

1969

BIBLIOTHEQUE TECHNIQUE PHILIPS

DUNOD
PARIS

Traduit du néerlandais par H. Piraux, Paris

D'autres versions dans la Bibliothèque Technique Philips en néerlandais, anglais, allemand et espagnol

Ce livre comporte 146 pages et 61 illustrations, dont 7 en plusieurs couleurs et une planche du triangle des couleurs

C.D.U. Nr. 621. 397. 132

Edition néerlandaise:
© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Pays-Bas 1963

Edition française:
© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Pays-Bas 1965

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

Première édition 1965
Deuxième édition 1967
Troisième édition 1969

Nous ne donnons pas la moindre assurance ou garantie que la matière exposée dans le présent ouvrage soit libre de droits de brevets; rien de ce qui y est publié ne peut être interprété comme accordant tacitement ou d'une autre manière une licence sur des brevets, quels qu'ils soient.

Imprimé aux Pays-Bas

AVANT-PROPOS

Ce livre a été écrit non seulement pour décrire les bases théoriques de la télévision en couleurs, mais aussi pour mieux faire connaître et rendre plus compréhensible à un nombreux public la solution de problèmes en partie très compliqués. Sous ce rapport, cet ouvrage comble une lacune dans la littérature spécialisée, car ce que recherche un lecteur n'est pas une explication scientifique précise d'un problème déterminé dans tous ses éléments importants et intéressants, mais un livre exempt de digressions inutiles, tout en restant compréhensible d'une façon générale.

Cet ouvrage doit intéresser en premier lieu les techniciens radio et télévision de développement et de service, de même que les élèves des écoles professionnelles et tous ceux qui s'occupent de télévision, aussi bien sur le plan technique que sur le plan commercial ou même comme téléspectateurs, et qui souhaitent développer leurs connaissances. Pour ces lecteurs, indépendamment d'une bonne compréhension, il suffit de connaître les bases de la télévision en noir et blanc, le livre ne nécessitant pas d'avoir de connaissances spéciales en physique et en mathématiques.

Aux questions traitées, quelques mots ont été ajoutés pour la partie la plus difficile du sujet, le système d'émission: aux Etats-Unis et au Japon, de nombreuses stations y émettent aujourd'hui des programmes de télévision en couleurs. Les deux pays utilisent le même système d'émission, développé en 1951 par le National Television System Committee américain (NTSC) et qui est décrit tout au long dans ce livre.

En Europe, on a cherché longtemps à établir une norme de télévision en couleurs européenne, du fait même que l'expérience acquise aux Etats-Unis avait révélé quelques inconvénients du système NTSC.

Les grands laboratoires européens cherchèrent donc de façon intensive des améliorations possibles; ainsi sont nés, en France le système SECAM et, en Allemagne le système PAL. Le premier est théoriquement un peu

plus simple et le second un peu plus compliqué que le NTSC.

On trouvera le développement relatif à ces deux systèmes au Chapitre IV: «Systèmes de transmission».

Eindhoven, juillet 1967 L'auteur

TABLE DES MATIERES

Avant-propos v

Chapitre 1 THEORIE FONDAMENTALE 1
Lumière et couleur 1
Le mélange des couleurs 3
Mélange soustractif de couleurs 4
Mélange additif de couleurs 8
Couleurs primaires et composantes chromatiques 10
La courbe de luminosité relative 13
Le diagramme de chromaticité 16
De quelques expressions et grandeurs utilisées en éclairagisme . 20

Chapitre 2 APPAREILLAGE DE PRISE DE VUES DE TELEVISION EN COULEURS 27
Construction fondamentale 27
La caméra 28
Le discriminateur de couleurs 29
Miroirs dichroïques 33
Réalisation pratique du discriminateur de couleurs 38
Objectifs de caméra; lentilles auxiliaires 39
Les tubes de caméras 44
Le gamma total du système 46
Calage des couleurs 50
Le pupitre de contrôle 53

Chapitre 3 SYSTEMES DE REPRODUCTION. 56
Le système à séquence de couleurs 56
Inconvénients du système à séquence de couleurs 58
Le système simultané 59
Le tube à masque 61
Convergence statique 64
Convergence dynamique 65
Pureté des couleurs 67

Construction générale du tube à masque 71
Système de projection de télévision en couleurs 73

Chapitre 4 LES SYSTEMES DE TRANSMISSION. . 76
Le signal de luminance Y 76
Répartition des fréquences 78
Le signal de chrominance 85
Démodulation du signal de chrominance. 91
Les signaux I et Q 98
Les phases de couleurs 104
Le système SECAM 115
Le systeme P.A.L. 125

Index 137

CHAPITRE 1

THEORIE FONDAMENTALE

Lumière et couleur

C'est *Newton* qui, cherchant à découvrir la nature de la lumière, en eut le premier une conception très révolutionnaire, à savoir que la lumière blanche du jour n'est pas la sorte de lumière la plus pure qui soit, mais, bien au contraire, un mélange homogène du nombre infini de couleurs et de teintes intermédiaires de l'arc-en-ciel, allant du violet au rouge, en passant par le bleu, le vert et le jaune. Cette conception téméraire, mais néanmoins bien fondée, était basée sur une observation elle-même très simple, consistant à faire passer un rayon lumineux par une fente étroite et en lui faisant traverser ensuite un prisme triangulaire en verre (fig. 3, page 5). Dans ces conditions, le rayon émergeant du prisme ne présente plus l'aspect d'une étroite ligne blanche, mais au contraire celui d'une séquence continue des couleurs citées plus haut et de leurs teintes intermédiaires sous forme d'un faisceau divergent.

Bien que Newton ne put donner d'explication satisfaisante pour les différences de réfraction entre les diverses couleurs lorsque la lumière blanche traverse un prisme de verre ou, tout au moins, une explication basée sur sa théorie des particules lumineuses (théorie corpusculaire de la lumière), sa définition de la lumière blanche du jour étant un mélange d'un nombre infini de couleurs «pures» est restée valable jusqu'à nos jours. Il était dû à *Huygens* de fournir la réponse au problème posé par les variations de réfraction dans le prisme de verre, car il fut le premier à assimiler la propagation de la lumière à un phénomène ondulatoire de longueurs d'onde extrêmement courtes.

D'après Huygens, la seule différence entre les différentes couleurs est celle de leurs longueurs d'onde, les plus longues étant celles de l'extrémité rouge de l'arc-en-ciel et les plus courtes celles de l'extrémité violette. Si l'on suppose que la lumière se propage plus lentement dans des milieux optiques tels que le verre que dans le vide et, de plus, d'autant plus lentement que la longueur

d'onde est plus courte, on peut aisément expliquer pourquoi, lorsque la lumière blanche tombe obliquement sur un milieu optique, les parties bleues et violettes (longueurs d'onde plus courtes) sont plus réfractées que les parties jaunes et rouges, de plus grandes longueurs d'onde.

Pendant trois cents ans, la théorie ondulatoire ainsi postulée par Huygens subit une opposition obstinée des adeptes de la théorie corpusculaire newtonienne; dès qu'une expérience venait en faveur de la première théorie, une autre semblait venir confirmer la seconde. Ce n'est qu'au cours des dernières décennies qu'il est devenu possible, à l'aide de la théorie quantique, d'expliquer exactement, bien que sous forme abstraite, la nature mystérieuse de la lumière, laquelle se manifeste sous deux aspects essentiellement différents.

Pour le but que nous poursuivons, il nous suffira de dire que la lumière est une forme d'énergie analogue à celle des champs électromagnétiques, que l'on peut décrire, dans le cas de ces derniers, comme un phénomène ondulatoire. Toutefois, alors que la gamme des longueurs d'onde des champs électromagnétiques (ou ondes radio, comme on les appelle généralement) s'étend d'une fraction de millimètre à environ dix mille mètres, les longueurs d'onde de la lumière visible couvrent une gamme relativement étroite, allant d'environ 700 nm pour la lumière rouge à environ 400 nm pour la violette.*) Bien que de telles longueurs d'onde nous paraissent habituellement très courtes, les rayons X et les rayonnements cosmiques ont des longueurs d'onde encore plus courtes. La fig. 1 représente schématiquement la totalité du spectre des ondes électromagnétiques, au stade actuel de nos connaissan-

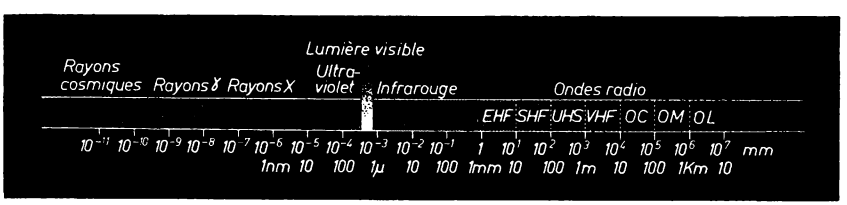


Fig. 1. Echelle des longueurs d'onde des oscillations électromagnétiques.

*) 1 nm (nanomètre) = un millionième de millimètre. Cette unité, désormais légale, se substitue à celles que l'on utilisait jusqu'ici, notamment le millimicron (mμ) et parfois l'Angström: (1 Å = 0,1 nm).

ces; la partie du spectre qui nous intéresse (la lumière visible) est reproduite séparément à la fig. 4 (page 5). Ce diagramme nous permet de déduire quelques conclusions importantes.

Le mélange des couleurs

Tout point sur l'échelle des longueurs d'onde correspond naturellement à une longueur d'onde déterminée, chacune d'entre elles étant perçue par l'oeil avec une certaine teinte ou nuance. Pratiquement, toutes ces nuances sont présentes dans la lumière blanche du soleil. La différence de longueur d'onde (et donc aussi la différence entre deux nuances contiguës sur l'échelle) est infiniment petite et l'œil humain ne peut l'apprécier, mais c'est le nombre «infiniment» grand de longueurs d'onde dans le spectre qui donne lieu à la gradation du violet au rouge en passant par le bleu, le vert et le jaune. Chaque nuance distincte est connue comme couleur *spectrale*, ces couleurs spectrales étant perçues par l'œil comme les couleurs les plus pures, les plus brillantes ou les plus «saturées». Elles ne peuvent pas être reproduites exactement par aucune des méthodes classiques, telles que l'imprimerie ou la peinture; elles n'existent qu'en tant que composantes spectrales de la lumière blanche produites par réfraction ou, individuellement, lorsqu'elles caractérisent la lumière émise par des vapeurs ou des gaz incandescents (par exemple, les «raies jaunes» de la vapeur de sodium, qui correspondent à 589 et 589,6 nm (v. fig. 4, page 5).

Indépendamment de ces nuances spectrales ou saturées, qui ne peuvent en général être observées qu'en laboratoire, il y a naturellement l'infinie variété des couleurs non saturées, ou couleurs mélangées, que nous percevons autour de nous dans notre vie quotidienne. Ces couleurs sont caractérisées par le fait que leur lumière n'est pas constituée par une longueur d'onde unique mais par plusieurs, dans la plupart des cas d'un très grand nombre. Dans ce sens, nous pouvons immédiatement distinguer trois cas très communs:

a. un groupe assez large de longueurs d'onde adjacentes (fig. 2*a*); on a une impression de couleurs «impures» dénaturées.

b. la présence de tout le spectre, plus ou moins uniformément réparti, où un groupe de longueurs d'onde est accentué (fig. 2*b*); l'impression est ici celle d'une couleur douce, pastellisée.

c. deux ou plusieurs groupes adjacents, mais indépendants, de longueurs

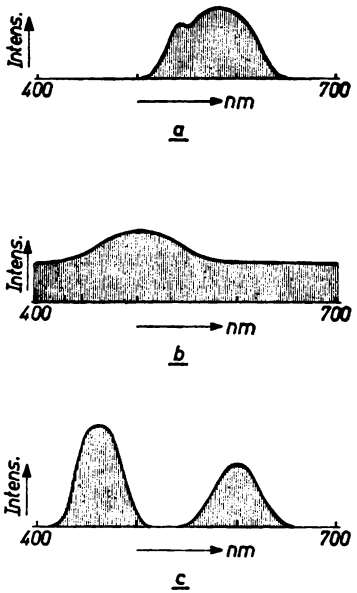


Fig. 2. Distribution des intensités des longueurs d'onde spectrales produisant différentes sensations visuelles de couleur:
a) vert jaunâtre non saturé ou impur,
b) vert bleuâtre pâle,
c) longueurs d'onde produisant une nouvelle sensation de couleur plus ou moins saturée.

d'onde (fig. 2*c*); on a dans ce cas aussi l'impression d'une seule couleur, se présentant soit comme une couleur plus ou moins tempérée du spectre reconnu, soit même comme une nouvelle couleur n'existant pas dans le spectre, telle que les pourpres (mélanges de rouge et de violet).

C'est précisément ce dernier cas qui est à la base, non seulement des techniques de la peinture et des impression en couleurs, mais aussi de la photographie et de la télévision en couleurs.

Ce que nous voyons à la fig. 2*c* sous une forme quelque peu abstraite n'est autre que la représentation du phénomène, bien connu de tous et porté à la perfection par les grands maîtres, d'après lequel le mélange de deux couleurs apparemment en produit une troisième, différente; c'est ainsi que le jaune et le bleu nous donnent du vert, le rouge et le bleu du violet, le jaune et le rouge de l'orangé et ainsi de suite. Cette méthode de mélange est dite *soustractive* et nous allons voir pourquoi elle est ainsi qualifiée.

Mélange soustractif de couleurs

Nous savons qu'une sensation de couleur est produite par des objets ou

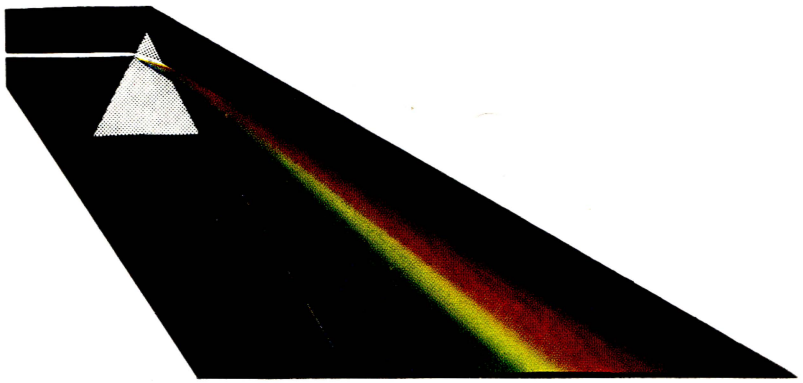


Fig. 3. Décomposition de la lumière blanche du soleil en couleurs spectrales pures en traversant un prisme.

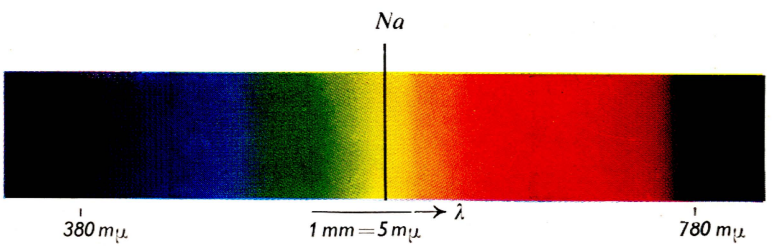
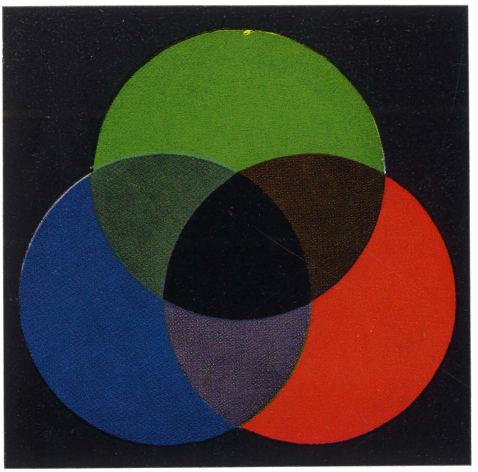
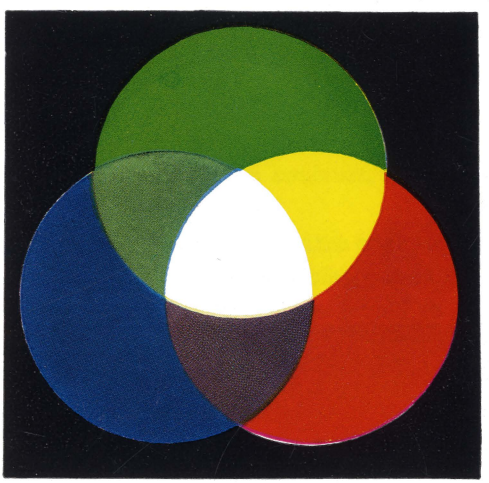


Fig. 4. Longueurs d'onde de la lumière visible.
Na = lumière émise par la lampe à vapeur de sodium sur les longueurs d'onde de 589 et 589,6 nm.



a



b

Fig. 5. a) Mélange soustractif de matières colorées.
b) Mélange additif de lumières colorées.

matières opaques, du fait que lorsque de la lumière blanche tombe sur eux, leur surface ne réfléchit pas en totalité de façon uniforme toutes les longueurs d'onde; seul un certain groupe de ces longueurs d'onde est réfléchi, toutes les autres étant absorbées à la surface (et converties en chaleur ou une autre forme d'énergie). L'objet ou la matière est ainsi vu avec la couleur correspondant aux longueurs d'onde qui ne sont pas absorbées mais réfléchies. Une pomme rouge, par exemple, absorbe le violet, le bleu, le vert et l'orangé et ne réfléchit donc que le rouge. Un objet paraît noir lorsqu'il absorbe toute la lumière visible, ou gris lorsque toutes les longueurs d'onde sont uniformément réfléchies, mais faiblement, la plus grande partie de la lumière incidente étant alors absorbée.

Dans les mélanges de couleurs destinés à l'imprimerie et à la peinture, on utilise des substances qui possèdent les propriétés réfléchissantes requises. Les pigments jaunes absorbent le violet, le bleu, le vert, l'orangé et le rouge, ne réfléchissant ainsi que le jaune. De même, les pigments bleus absorbent le violet, le vert, le jaune, l'orangé et le rouge et ne reflètent que le bleu. Si l'on mélangeait intimement deux pigments jaune et bleu, de couleurs pures saturées ne réfléchissant qu'une bande très étroite de longueurs d'onde, le résultat paraîtrait noir; le faible résidu du spectre non absorbé par l'un des pigments serait absorbé par l'autre. On doit cependant noter que les pigments habituels n'ont pas un tel degré de pureté ou de saturation, réfléchissant une bande assez large de longueurs d'onde. C'est ainsi qu'un pigment jaune réfléchit en fait des parties appréciables des couleurs spectrales voisines vertes et orangées; de même, des pigments bleus réfléchissent un peu de vert et de violet. On voit que le vert est la seule couleur du spectre qui est réfléchie par les deux pigments. C'est la raison pour laquelle le mélange d'un pigment jaune avec un pigment bleu donne du vert.

Si l'on mélange ensemble plus de deux pigments, les chances de réflexion d'une bande donnée de longueurs d'onde par tous deviennent beaucoup plus faibles. En général, le mélange devient d'autant plus sombre qu'il contient plus de couleurs individuelles, étant donné que chaque addition successive «soustrait» du spectre une autre bande de longueurs d'onde. La fig. 5a (v. page 6) représente ce mélange de pigments pour les trois couleurs rouge, vert et bleu. On se souviendra cependant que dans le travail pratique en peinture et dans l'imprimerie, un tel mélange de couleurs est moins simple qu'on pourrait le supposer d'après l'exemple précédent, parce qu'à côté du mélange

soustractif, on y trouve également un mélange additif. Le paragraphe suivant nous montrera ce qu'on entend par cette dernière expression.

Mélange additif de couleurs

Indépendamment de la méthode soustractive de mélange des couleurs, la méthode *additive* de mélange de lumières colorées a une importance particulière en télévision. Cette expression s'applique lorsqu'à la place de pigments, on mélange deux ou plusieurs lumières de couleurs différentes; par ce mélange, nous entendons que la lumière provenant des sources considérées, par exemple, est projetée sur un écran unique, sur lequel l'œil perçoit le résultat obtenu. Dans ce cas, on peut dire que ce résultat est inhabituel, du fait que la couleur réfléchie par l'écran *n'a rien de commun avec la couleur de l'une quelconque des sources.*

Contrairement au mélange soustractif, il est absolument impossible de déterminer d'après le spectre des longueurs d'onde la couleur qui sera réfléchie. Par exemple, un mélange de lumière verte et de lumière rouge donne du jaune et un mélange de rouge et de bleu donne un pourpre, qui n'existe aucunement dans le spectre naturel et auquel on ne peut donc attribuer une longueur d'onde particulière. La fig. 5b (v. page 6) expose ces phénomènes additifs pour le rouge, le vert et le bleu. Si nous comparons maintenant les fig. 5a et b, le résultat le plus frappant est probablement le fait que si l'on mélange des pigments rouge, vert et bleu, nous avons du noir, c'est-à-dire aucune réflexion, alors qu'avec un mélange de lumières de ces mêmes couleurs on obtient du blanc ou, pour nous exprimer plus correctement, l'oeil reçoit une sensation de blanc. En fait, cela n'est pas si étrange, car, comme l'a fait remarquer Newton, la lumière blanche n'est pas une entité indépendante, mais la sensation combinée perçue par la rétine des stimulus qui lui sont appliqués par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

De nombreuses expériences ont prouvé qu'il est possible de simuler la lumière blanche en utilisant des sources lumineuses de deux couleurs seulement et non seulement avec deux couleurs spécifiques, mais avec une variété infinie de telles paires. Par exemple, à toute longueur d'onde dans la partie rouge du spectre correspond une certaine longueur d'onde dans le bleu-vert qui, mélangée à la première, donne la sensation visuelle de la lumière blanche; pour chaque longueur d'onde dans le jaune, il y en a une dans le bleu qui

produit le même effet et ainsi de suite. La seule condition nécessaire pour que ce phénomène ait lieu est que les intensités des deux rayons lumineux soient dans un rapport déterminé. De telles paires de couleurs, donnant lieu à une impression visuelle de blanc lorsqu'on les mélange additivement, sont dites *couleurs complémentaires.*

Nous venons à l'instant de mentionner que pour simuler la lumière blanche avec deux sources lumineuses complémentaires, il était essentiel que les intensités soient entre elles dans une certaine proportion. Toutefois, si nous étendons l'expérience à *trois* couleurs au hasard, par exemple le rouge, le vert et le bleu indiqués dans la fig. 5b et si nous faisons varier les intensités à volonté, nous nous apercevrons que la plupart des couleurs observées dans la vie de chaque jour, y compris le blanc, peuvent aussi être reproduites. Ce fait, connu également de Newton, est la base virtuelle de la télévision en couleurs.

Scientifiquement, il n'est pas encore possible d'expliquer dans le détail la raison de ce phénomène; on peut seulement dire qu'il est le résultat de processus physiologiques et psychologiques entre la rétine et les centres visuels du cerveau. On suppose que les «cônes»*) de la rétine sont de trois sortes, étant surtout sensibles respectivement au rouge, au vert et au bleu; mais leur sensibilité ne se limite pas à des bandes très étroites de longueurs d'onde, s'étendant dans chaque cas dans les bandes adjacentes de longueurs d'onde (couleurs) dans certaines proportions décroissantes.

Si, par exemple, une lumière jaune tombe sur la rétine, aucune des trois sortes de cônes n'est stimulée à la valeur maximale, mais ceux qui sont sensibles au rouge et au vert réagissent et transmettent leur message au cerveau conscient, lequel identifie comme «jaune» l'ensemble des stimulus. Si les mêmes cônes sont stimulés au même degré par des lumières rouge et verte sous certaines intensités, on obtient le même résultat, c'est-à-dire une sensation de jaune. Nous pouvons parfaitement concevoir un grand nombre (théoriquement, infini) de combinaisons lumineuses dans les rouges et les verts qui, pourvu qu'elles atteignent la rétine dans le rapport convenable de leurs intensités, donneront lieu à la même impression de nuance de jaune. Inversement, une modification des intensités de deux sources lumineuses de nuances immuables de rouge et de vert doit donner lieu à toute une gamme

*) Voir: W. A. Holm, *Télévision sans mathématiques*, p. 11 (Bibliothèque Technique Philips).

de stimulus dans les cônes rouges et verts de la rétine correspondant à la partie du spectre comprise entre le rouge et le vert, en passant par l'orangé, le jaune et le jaune-vert.

On pourrait conclure que si la source de lumière verte était remplacée par une source bleu et qu'on fasse varier l'intensité des sources bleu et rouge, il devrait être possible de reproduire toutes les couleurs comprises dans le spectre des longueurs d'onde entre le rouge et le bleu. Cependant, cela représenterait la totalité du spectre et les choses ne se passent pas ainsi. Avec ces deux sources lumineuses, nous ne recevons que des impressions variant du violet au pourpre (les «pourpres») et comme la plupart de ces teintes n'apparaissent pas dans le spectre naturel, elles n'ont pas non plus de longueurs d'onde caractéristiques.

Ce n'est que lorsque nous ajoutons une troisième source lumineuse, par exemple simultanément une rouge, une verte et une bleue, qu'il est possible, en modifiant leurs rapports d'intensités, de produire presque toutes les couleurs rencontrées dans la pratique, aussi bien que les pourpres. Toutes les couleurs peuvent être d'autant mieux reproduites avec succès que les sources lumineuses utilisées correspondent de plus près aux couleurs spectrales; dans ce sens, on peut dégager un important principe, basé uniquement sur le phénomène physiologique de la vision:

> Toute sensation de couleur désirée peut être produite avec trois couleurs de lumière dans les rapports d'intensités appropriés; de même, on peut obtenir toute sensation de couleur désirée en faisant varier les rapports d'intensités de lumières de trois couleurs données.

Cependant, nous verrons plus loin que cette règle simple souffre de certaines imperfections, amenant certaines limitations dans son application pratique. C'est néanmoins le principe fondamental le plus important dans la science des couleurs, ou colorimétrie.

Couleurs primaires et composantes chromatiques

Le principe ci-dessus étant établi, il faut tout d'abord lui donner une signification quantitative en vue de son application pratique. Dans ce but, on a fait un grand nombre d'expériences avec des centaines de personnes afin, non seulement de déterminer les trois couleurs *primaires* de lumière dont la combinaison donnerait le plus grand nombre de couleurs spectrales les plus

pures que possible, mais aussi de fixer les rapports des intensités des trois sources lumineuses qui seraient nécessaires pour reproduire toute couleur spectrale donnée. Les résultats de ces expériences ont été réunis par la C.I.E. (Commission Internationale de l'Eclairage) sous la forme de normes internationales que reproduit graphiquement la fig. 6. Ces normes se réfèrent aux couleurs spectrales pures suivantes:

Rouge: longueur d'onde 700 nm
Vert : longueur d'onde 546,1 nm
Bleu : longueur d'onde 435,8 nm

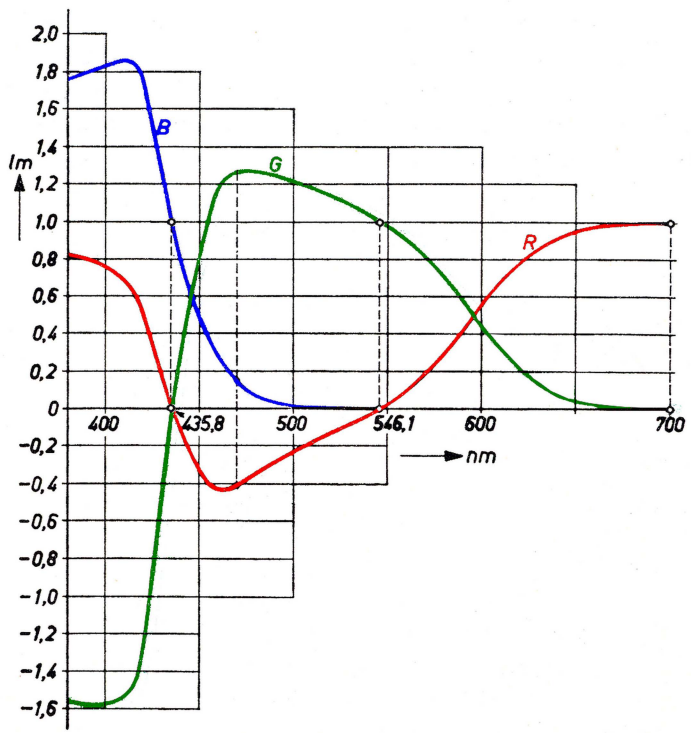


Fig. 6. Valeurs de tristimulus des couleurs spectrales. Les couleurs primaires sont le bleu (435,8 nm), le vert (546,1 nm) et le rouge (700 nm).

Les trois courbes *R*, *V* et *B* de la fig. 6 montrent l'intensité, exprimée en lumens (lm), que chacune des sources primaires doit avoir pour reproduire une des couleurs spectrales comprises entre 400 et 700 nm avec l'intensité de 1 lm (le lumen est l'unité de flux lumineux, défini comme la totalité de la lumière émise dans toutes les directions par une source lumineuse et qui peut être, dans une certaine mesure, comparée à la puissance radiante; nous reviendrons plus loin, page 22, sur ce point).

Nous pouvons dire ainsi, à l'instar de la terminologie mécanique, que toutes les couleurs spectrales peuvent être obtenues à partir des trois *composantes R*, *V* et *B* et, par suite, que les valeurs relatives de *R*, *V* et *B* en chaque point de l'échelle des longueurs d'onde sont les valeurs des composantes de couleur*) de la couleur spectrale particulière. Nous allons montrer plus loin que toute autre couleur de mélange peut aussi être composée de composantes *R*, *V* et *B* appropriées pour répondre à des conditions données.

D'après la fig. 6, on voit que, pour obtenir des couleurs spectrales de longueur d'onde inférieure à 546 nm, l'une des deux couleurs de lumière choisies doit être dans chaque cas de nature négative. Sur le plan pratique cela est naturellement impossible, mais il est néanmoins important d'admettre une telle conception pour poursuivre notre théorie. De telles valeurs négatives nous apprennent que dans cette partie du spectre, il n'est pas possible d'obtenir de couleurs spectrales pures, mais seulement un mélange d'une couleur spectrale et de la proportion de la couleur spectrale qui est négative à cette longueur d'onde. Par exemple, on ne peut obtenir le bleu-vert spectral de 470 nm, mais il est possible de réaliser un mélange de cette couleur avec une certaine proportion de rouge primaire. Exprimé en valeurs, un mélange de 1 lm de bleu-vert (470 nm) et d'environ 0,42 lm de rouge (700 nm) donne la même impression de couleur qu'environ 1,28 lm de vert (546,1 nm) mélangé à approximativement 0,14 lm de bleu (435,8 nm).

Sans autre explication, il est évident qu'aux points sur l'échelle des longueurs d'onde de la fig. 6 qui correspondent aux trois couleurs primaires choisies, l'intensité de la couleur primaire particulière doit être de 1 lm, mais aussi que les deux autres primaires ne peuvent être présentes; ces points se trouvent en 435,8 — 546,1 et 700 nm. De plus, en accord avec la nature additive des flux lumineux mélangés, la somme des trois valeurs sur les

---

*) L'expression correcte est «coefficients de couleur trichromatiques».

courbes doit être la même pour chaque point sur l'échelle des longueurs d'onde, c'est-à-dire en accord avec la valeur acceptée de 1 lm.

Les courbes R, V et B de la fig. 6 ne conviennent que pour reconstituer des couleurs spectrales, c'est-à-dire des couleurs qui correspondent théoriquement à une longueur d'onde unique; la reproduction de toutes les couleurs que nous voyons tous les jours autour de nous est quelque peu plus difficile, car elles n'ont presque jamais une seule longueur d'onde, mais presque toujours représentent plusieurs d'entre elles réparties de façon continue sur une partie plus ou moins grande de l'échelle spectrale (fig. 2). Dans de tels cas, la méthode, au moins théoriquement, consiste à déterminer au moyen des valeurs des courbes R, V et B (fig. 6) les trois composantes primaires correspondant à chacune des longueurs d'onde en cause, ces composantes pures rouge, verte et bleue étant ajoutées ensemble chaque fois pour constituer une composante totale rouge, verte et bleue. Les valeurs de ces composantes totales déterminent alors les intensités avec lesquelles les trois sources lumineuses primaires (435,8 — 546,1 et 700 nm) doivent être mélangées additivement pour donner lieu au stimulus chromatique désiré.

La courbe de luminosité relative

Avant de commencer à mettre en pratique ce que nous venons d'exposer, la première chose à faire est de déterminer la distribution des intensités des diverses longueurs d'onde dont la lumière est constituée. Dans ce but, de même en fait que pour toutes les techniques de mesures, on doit utiliser un appareillage qui permette des mesures quantitatives réelles, en faisant abstraction de considérations subjectives, lesquelles peuvent varier suivant les conditions de l'essai. Dans la mesure de la lumière et des couleurs, les méthodes objectives sont de la plus grande importance; en effet, les appréciations subjectives des couleurs et des luminosités telles qu'elles sont émises par différents observateurs, diffèrent invariablement et de façon considérable dans les cas extrêmes, cela étant dû partiellement, ou même totalement, à une vision défectueuse des couleurs. Etant donné que la sensation subjective de la lumière a son origine dans une certaine forme d'énergie, qui est une énergie radiante électromagnétique, la solution évidente consiste à baser tous les calculs théoriques nécessaires en premier lieu sur des méthodes objectives de mesure de cette énergie.

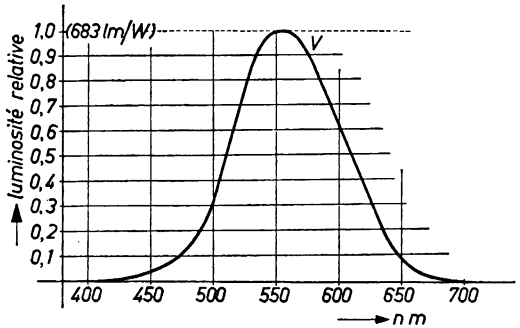


Fig. 7. Courbe de luminosité relative montrant la sensation de luminance produite par les couleurs spectrales individuelles émises à égale énergie.

Un fait réellement très frappant observé dans toutes les mesures d'énergie radiante dans la gamme spectrale (colorimétrie), est la différence marquée entre les valeurs d'énergie mesurées et les impressions correspondantes de lumière telle qu'elles sont perçues par l'œil pour chaque valeur de ce genre. La fig. 7 montre le rapport entre la puissance radiante (exprimée en watts) et l'impression de lumière (en lumens), observé pour toutes les longueurs d'onde. Cette courbe, de même que celles de la fig. 6, représente la moyenne des résultats d'un très grand nombre d'expériences faites avec le concours d'un très grand nombre de personnes choisies comme sujets; elle a été normalisée pour être ce qu'on appelle la *courbe de luminosité relative*. Elle indique la variation de luminance ou *luminosité* des diverses couleurs spectrales pour l'observateur «moyen», pour une énergie radiante constante émise par les sources lumineuses spectrales respectives.

On voit sur la figure que la sensibilité de l'œil humain est la plus grande pour une lumière verte ayant une longueur d'onde d'environ 555 nm, décroissant à la fois vers les extrémités rouge et bleue du spectre; les longueurs d'onde supérieures à environ 700 nm ou plus courtes que 400 nm environ ne sont aucunement perçues comme lumière, bien que ces longueurs d'onde puissent être émises par la source sans diminution d'énergie. De ces radiations invisibles, les premières sont des ondes thermiques et les secondes des radiations ultraviolettes. On doit ajouter que sur les longueurs d'onde optimales de conversion d'énergie radiante en lumière visible, c'est-à-dire à environ

555 nm, une puissance radiante de 1 W correspond à un flux lumineux d'environ 680 lm.

Après cette brève mais nécessaire digression, nous pouvons reprendre notre raisonnement où nous l'avions laissé, sur le problème de la détermination des trois composantes de couleurs primaires qui nous permettront de reproduire la lumière d'une couleur de mélange couvrant une bande plus ou moins large du spectre des longueurs d'onde. Nous avons déjà fait remarquer que pour y parvenir, on doit tout d'abord déterminer la concentration des intensités de toutes les longueurs d'onde présentes dans la couleur de mélange. La meilleure façon d'y parvenir consiste à faire des mesures d'énergie sur toute l'étendue du spectre. Les longueurs d'onde individuelles ainsi définies peuvent alors être décomposées en leurs composantes à l'aide des courbes R, V B (fig. 6); celles-ci, additionnées, nous donneront les composantes rouge, verte et bleue totales.

Cependant, comme les diverses longueurs d'onde émises avec une puissance uniforme sont perçues par l'œil comme lumière avec un rendement différent, il est évident qu'on ne peut simplement additionner les composantes telles quelles; on doit d'abord les multiplier par les facteurs respectifs indiqués par la courbe de luminosité. On se souviendra que les courbes de la fig. 6 ne sont pas basées sur les valeurs de puissance en tant que telles, mais sur des comparaisons d'impressions subjectives de couleurs et de luminosités. La méthode la plus simple consiste donc à multiplier les valeurs des trois courbes de la fig. 6 par celles de la courbe de luminosité relative et à utiliser ces nou-

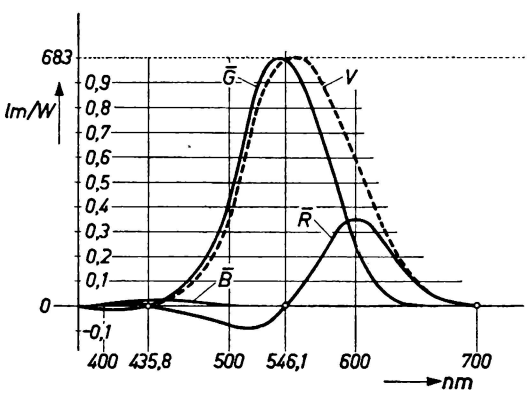


Fig. 8. Coordonnées trichromatiques des couleurs spectrales. Les couleurs primaires sont les mêmes que celles de la fig. 6. La courbe de luminosité relative est indiquée par la courbe tiretée.

velles courbes $\bar{R}$, $\bar{G}$ et $\bar{B}$, comme le montre la fig. 8, pour déterminer les composantes de couleur primaires individuellement pour chaque longueur d'onde. Cela étant fait, il est seulement nécessaire d'additionner les composantes individuelles pour obtenir immédiatement, en lumens, les composantes totales rouge, verte et bleue de la couleur désirée. En bref, en utilisant R lm de rouge (700 nm), G lm de vert (546,1 nm) et B lm de bleu (435,8 nm), le stimulus de couleur désiré peut être produit correctement tant en ce qui concerne la luminosité que la nuance.

Le diagramme de chromaticité

S'il est vrai que les courbes de la fig. 8 sont parmi les aides théoriques les plus importantes dans les calculs colorimétriques et pour la télévision en couleurs, elles ne sont pas tellement adaptées aux utilisations d'ordre pratique; il est possible de trouver une méthode plus aisée de représentation. Sans entrer dans trop de détails, on peut dire que des calculs mathématiques simples nous permettent de transformer les trois composantes $\bar{R}$, $\bar{G}$ et $\bar{B}$ que l'on peut aussi considérer comme des *coordonnées spatiales*, dans un autre système du même genre. Une caractéristique de ce dernier, qui a été choisi arbitrairement, est que la sensation de luminosité est représentée par une seule coordonnée (la coordonnée Y), alors que la caractérisation de la couleur elle-même, c'est-à-dire la nuance et la saturation sont exprimées par les coordonnées X et Z. Pour une indication sans équivoque du stimulus de couleur, il suffit simplement de mentionner ces deux dernières coordonnées. On notera cependant que ces valeurs ne sont pas des mesures directes de la nuance et de la saturation, mais que le rapport entre la nuance et la saturation d'une part, et X et Z d'autre part est complexe. La transformation ci-dessus a été effectuée pour toutes les couleurs spectrales et les résultats en ont été traduits sous forme de tables de *stimulus trichromatiques*.

S'il n'est question que de fixer la valeur de la nuance et non de la luminance, une autre conversion des courbes nous donne une représentation graphique très pratique à deux dimensions d'un système de coordonnées x et y. C'est le *diagramme de chromaticité* (triangle des couleurs) reproduit sur un dépliant à la fin de ce volume et schématiquement dans la fig. 9. La surface incurvée contient toutes les couleurs spectrales réelles (sur le périmètre), de même que les couleurs de mélange qui n'existent qu'en tant que sensations

visuelles (à l'intérieur de la surface fermée et le long de la ligne-limite du bas). Toute couleur concevable peut être trouvée en un point donné à l'intérieur de la figure et est défini sans ambiguité par les coordonnées x et y. Nous devons faire remarquer ici qu'aucune méthode d'impression, de peinture ou toute autre forme de procédé de reproduction n'est capable de reproduire exactement ce diagramme de chromaticité dans toutes ses nuances, non seulement parce que ce but est au-delà des possibilités humaines, mais aussi parce que les encres d'imprimerie et les peintures n'atteignent pas la pureté des couleurs spectrales et ne peuvent donc les imiter.

Même si l'on n'a pas connaissance des raisonnements mathématiques utilisés dans la construction du diagramme de chromaticité, il est possible de trouver une analogie de celui-ci avec la courbe de l'arc-en-ciel, l'échelle des longueurs d'onde étant très comprimée aux extrémités dans le rouge et dans le bleu. Comme nous l'avons dit, les couleurs spectrales pures se trouvent sur le périmètre du diagramme; ces mêmes couleurs apparaissent de plus en plus diluées, c'est-à-dire de moins en moins saturées, en se rapprochant du centre de la figure. Au centre, se trouve le «blanc». Les extrémités libres au bas de la courbe sont imaginées être reliées par une droite, sur laquelle on trouve les pourpres dont nous avons parlé précédemment; ce sont des mélanges de rouge et de bleu qui n'existent qu'en tant que sensations visuelles, mais aucunement dans le spectre naturel.

Indépendamment des indications précédentes pour la détermination de tout point de couleur désiré à l'intérieur de la courbe au moyen des coordonnées x et y, nous pouvons aussi attribuer à chaque point de couleur une *longueur d'onde dominante*, celle-ci étant obtenue sur la périphérie de la courbe en traçant une droite du point blanc du triangle à travers le point de couleur. On peut également attribuer une longueur d'onde dominante aux pourpres en traçant une droite passant par le point blanc jusqu'à la périphérie de la courbe; cependant, la longueur d'onde ainsi trouvée doit être précédée du signe—*).

Pour être complets, nous pourrions peut-être ajouter que si le système

*) En fait, le point blanc n'est pas un véritable point, mais une petite surface à l'intérieur du triangle; dans cette surface, la C.I.E. a désigné deux sortes de blanc, le Blanc Standard B qui correspond à la lumière solaire à midi et le Blanc Standard C qui correspond à la lumière normale du jour, un peu plus bleutée. C'est ce dernier qui est considéré comme blanc normalisé pour les besoins de la télévision. Indépendamment de ces deux normes, il existe un Blanc Standard A, adopté comme norme pour la lumière à incandescence.

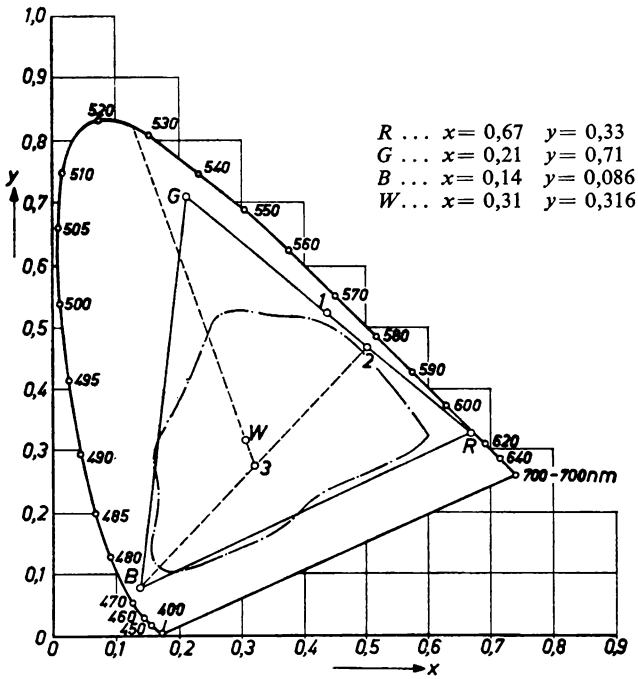


Fig. 9. Diagramme de chromaticité. *R*, *G* et *B* sont les couleurs primaires adoptées pour la télévision en couleurs. *W* = point blanc (illuminant standard *C*). Toutes les couleurs incluses dans le triangle *R-G-B* sont reproduites en télévision en couleurs; la courbe tiretée montre les couleurs reproduites par d'autres méthodes (peinture, imprimerie, films en couleurs, etc.).

de coordonnées *X*, *Y*, *Z* utilisé comme base du diagramme de chromaticité est celui qui a été normalisé par la C.I.E. et qu'il est aussi utilisé pour la télévision en couleurs, d'autres systèmes de coordonnées ont été adoptés pour d'autres buts.

L'avantage pratique du diagramme de la C.I.E. est que la disposition particulière des valeurs x et y permet de déterminer immédiatement le résultat du mélange additif de deux ou plusieurs lumières colorées quelconques à l'aide d'un diagramme géométrique simple, comme le montre la fig. 9, où le diagramme de chromaticité est reproduit schématiquement.

R et *G* sont respectivement des sources rouge et verte dont les longueurs

d'onde dominantes sont environ 615 nm et 537 nm et ayant les coordonnées x et y indiquées sur la figure. Les deux sources émettant des lumières de même intensité, le point de couleur correspondant au mélange des couleurs se trouve exactement au centre de la ligne reliant R à G, soit au point 1, dont la longueur dominante est environ 572 nm (jaune). Si l'intensité de R était double de celle de G, la ligne R—G devrait être divisée dans la proportion de 2 : 1, nous donnant ainsi le point 2, à une longueur d'onde dominante d'environ 580 nm (orangé). L'intensité de la lumière résultante est ainsi la somme des intensités de R et G qui, pour un rapport 2 : 1 est une intensité relative de 3.

Si nous ajoutons maintenant une troisième source lumineuse bleue B, ayant les coordonnées indiquées sur la figure et également à une intensité relative de 3, le point de couleur du mélange R-G-B se trouve au centre (3) d'une ligne reliant B au point 2. L'intensité relative de cette nouvelle lumière est $3 + 3 = 6$ et la couleur manque de saturation, se présentant comme un pourpre très atténué avec une longueur d'onde dominante fictive (négative) d'environ — 527 nm (voir page 17).

Nous devons mentionner ici qu'en prolongeant la droite au-delà du point blanc, on peut aussi déterminer la couleur complémentaire. Il suit des propriétés du diagramme de chromaticité tel que nous l'avons décrit que les couleurs complémentaires qui, mélangées, donnent du blanc doivent se trouver sur une droite passant par le point blanc. Théoriquement, il y a un nombre «infini» de paires de points de couleur sur cette droite qui donnent du blanc si on les mélange, pour autant que leurs rapports d'intensités soient inversement proportionnels à leur distance du point blanc.

L'exemple ci-dessus est suffisant pour montrer que tout stimulus de couleur peut être produit, dont la spécification chromatique se trouve à l'intérieur du triangle formé par R, G et B, simplement en faisant varier les intensités des trois sources lumineuses. Cela étant, s'il s'agit de produire le plus grand nombre possible de couleurs en faisant varier les intensités des trois sources lumineuses (comme en télévision, entre autres), les points de couleur des trois sources doivent être éloignés le plus possible les uns des autres sur la courbe du diagramme de chromaticité. En ce qui concerne la télévision, on doit cependant se souvenir que les sources lumineuses sont en réalité des substances luminescentes sur l'écran du tube-image et que pour la lumière qu'elles émettent, la conversion de l'énergie des électrons en énergie lumi-

neuse ne s'effectue pas dans chaque cas avec un rendement élevé. Afin d'obtenir un compromis optimal sous ce rapport, on a trouvé et normalisé des substances, dont les points de couleur correspondent aux points *R*, *G* et *B* dans la fig. 9. Le triangle inscrit entre ces trois points est relativement grand et comprend pratiquement toute la gamme des couleurs nécessitées par tous les besoins habituels, spécialement la zone très importante comprise entre le rouge et le vert, si essentielle entre autres pour la reproduction des teintes de la peau. L'efficacité de ce choix de couleurs primaires saute aux yeux si l'on compare le triangle *R-G-B* à la surface délimitée par la ligne tiretée, laquelle représente la gamme des couleurs que l'on peut obtenir avec tous les autres moyens de reproduction, tels que l'imprimerie, la peinture et les films en couleurs.

Avant de discuter l'application du diagramme de chromaticité à la télévision en couleurs, il est nécessaire de dire quelques mots au sujet de certains termes utilisés quelquefois jusqu'ici dans ces pages, tels que luminosité, nuance et saturation. Si nous avons l'intention d'entrer dans le détail, c'est que, même dans les cercles techniques, les conceptions erronées ne sont pas rares.

De quelques expressions et grandeurs utilisées en éclairagisme

Lorsqu'on désire définir clairement une sensation de lumière ou de couleur, il suffit de donner trois expressions caractéristiques, la *luminosité*, la *nuance* et la *saturation*. Il n'est pas nécessaire de s'appesantir sur les deux dernières; la nuance est l'attribut de l'impression visuelle de lumière ou de couleur pour laquelle nous avons adopté diverses désignations suivant l'échelle des couleurs, telles que carmin, jaune citron, vert mousse, etc., mais en excluant des termes tels que rose, vert pâle, bleu foncé et ainsi de suite. Cela parce que ces derniers termes n'expriment pas en premier lieu la nuance, mais plutôt la saturation. Le rose qualifie une sensation visuelle d'une couleur plus ou moins pâle dans la région rouge du spectre, mais ne donne aucune indication entre les diverses nuances qui existent entre le vermillon et le pourpre. En nous référant au diagramme de chromaticité, nous pouvons dire que la nuance n'est déterminée que par la longueur d'onde dominante du point de couleur particulier, sa distance au point blanc étant une mesure de la saturation.

Le concept de luminosité est moins aisément défini. Bien que le mot «brillance» soit si facilement compris dans le langage courant, il est difficile de définir l'usage correct du terme «luminosité» utilisé par les techniciens.

Sans aller trop loin, on peut surmonter cette difficulté en donnant à ce terme la signification de *sensation visuelle subjective de brillance* de la lumière ou de la couleur. Ainsi, des sources lumineuses ou des objets éclairés n'ont pas de luminosité propre; ils ne se manifestent sur l'oeil qu'avec une certaine luminosité qui dépend beaucoup des influences extérieures telles que, par exemple, la distance à laquelle la source ou l'objet sont observés, l'angle sous lequel on les voit et la luminosité de l'environnement ou du fond. Il n'est naturellement pas possible d'appliquer une méthode quelconque de mesure à une telle conception purement subjective.

En même temps et même s'il n'était pas possible de parler de brillance ou de luminosité, on doit noter que tous les phénomènes lumineux possèdent une certaine propriété qui les caractérise, responsable de la stimulation d'une sensation visuelle et qui dépend de la puissance de la source (et aussi des conditions extérieures); cette propriété est l'*intensité lumineuse*. Prenons le cas de la très petite tache lumineuse d'une lampe électrique de poche; avec une batterie usée, le filament produit sur la rétine l'impression d'une luminosité bien plus faible qu'avec une pile neuve, parce que l'intensité lumineuse du filament est beaucoup plus élevée dans le deuxième cas. Si l'on place un réflecteur en arrière de l'ampoule, l'intensité lumineuse est doublée vers l'avant, mais elle est nulle en arrière; l'intensité lumineuse de la lumière émise par une source peut ainsi varier suivant la direction. De plus, l'intensité lumineuse n'a rien à voir avec les dimensions de la source, plus exactement de la surface qui émet la lumière; si, par exemple, des objets sont vus avec une certaine luminosité au moyen d'une lampe de poche et s'ils paraissent avoir la même luminosité en remplaçant la lampe de poche par une bougie placée au même endroit, l'intensité lumineuse de la flamme sera la même que celle du minuscule filament de l'ampoule, qui est virtuellement une «source ponctuelle».

Par suite, l'intensité lumineuse d'une source de lumière peut être donnée en général en fonction de la direction de la lumière et elle est une mesure de l'intensité avec laquelle la surface totale de la source émet de la lumière dans cette direction.

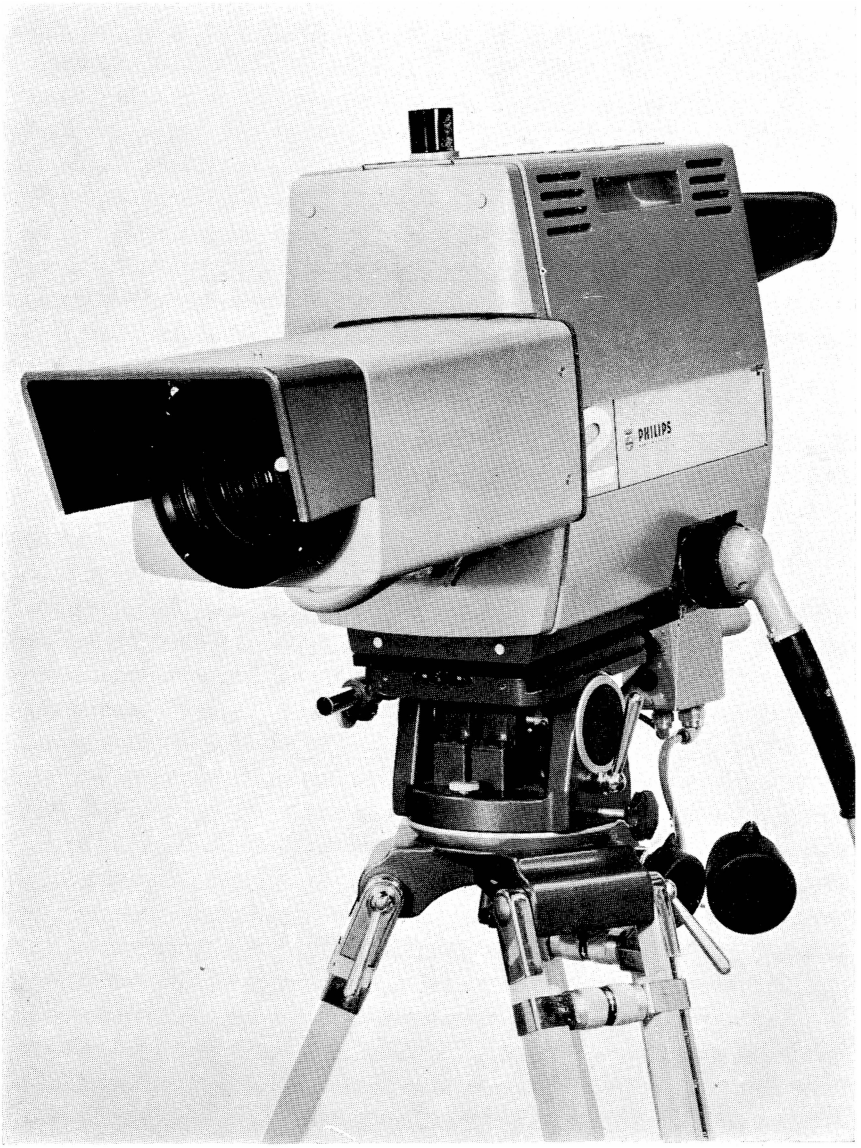
L'unité internationale d'intensité lumineuse est la *candela* (cd), équi-

valant à 1/60 de l'intensité lumineuse émise dans une direction perpendiculaire par un centimètre carré d'un «radiateur intégral» à la température de solidification du platine (1774°).

Etant donné, comme nous venons de le dire, que l'intensité lumineuse d'une source de lumière peut varier suivant la direction (un bon exemple est celui des lampes fluorescentes tubulaires, dont l'intensité lumineuse est pratiquement nulle longitudinalement, mais très élevée dans toutes les autres directions) il est évident que cette grandeur ne donne aucune information sur la quantité totale de lumière émise par une source dans toutes les directions. Pour cela, nous utilisons le terme *flux lumineux;* le flux lumineux émis par une source est équivalent à l'énergie lumineuse émise. En reprenant notre précédent exemple, celui d'une lampe de poche qui éclaire mieux son entourage avec une pile neuve qu'avec une batterie usée, on peut dire aussi que si l'on augmente la puissance électrique, la puissance lumineuse, ou mieux le flux lumineux, s'accroît également. D'autre part, si l'intensité lumineuse d'une lampe est accrue dans une direction à l'aide d'un miroir et en même temps réduite dans l'autre, cela ne modifie nullement la puissance radiante totale émise par la lampe, autrement dit le flux lumineux reste le même. La seule différence est que dans un cas le flux lumineux total est uniformément réparti dans toutes les directions, alors que dans l'autre il est plus élevé par angle solide unité dans une direction plutôt que dans une autre. L'unité de flux lumineux est le *lumen* (lm); c'est le flux lumineux émis par angle solide unité (1 stéradian) par une source ponctuelle uniforme ayant une intensité lumineuse de 1 candela.*)

Pour éviter toute possibilité d'erreur, nous devons faire remarquer que lorsque nous parlons de flux lumineux, nous faisons allusion à la seule partie de l'énergie radiante émise par une source lumineuse qui est perçue par l'oeil en tant que *lumière*; par suite, lorsqu'on exprime un flux lumineux en valeurs, celles-ci doivent se rapporter à la courbe de luminosité (fig. 7, page 14). Si trois sources lumineuses, rouge, verte et bleue, paraissent à l'oeil de luminosités équivalentes et qu'on mesure celles-ci avec une cellule photoélectrique de sensibilité uniforme sur toute l'étendue du spectre, on s'aperçoit que l'intensité de la lumière rouge et même plus encore celle de la lumière

*) Alors qu'en géométrie plane l'unité angulaire (1 radian) est obtenue en divisant la circonférence du cercle par $2\pi r$ (circonférence $= 2\pi r$), l'angle solide unité s'obtient en divisant la surface d'une sphère par $4\pi r^2$ (surface de la sphère $= 4\pi r^2$).



Une caméra couleurs moderne.

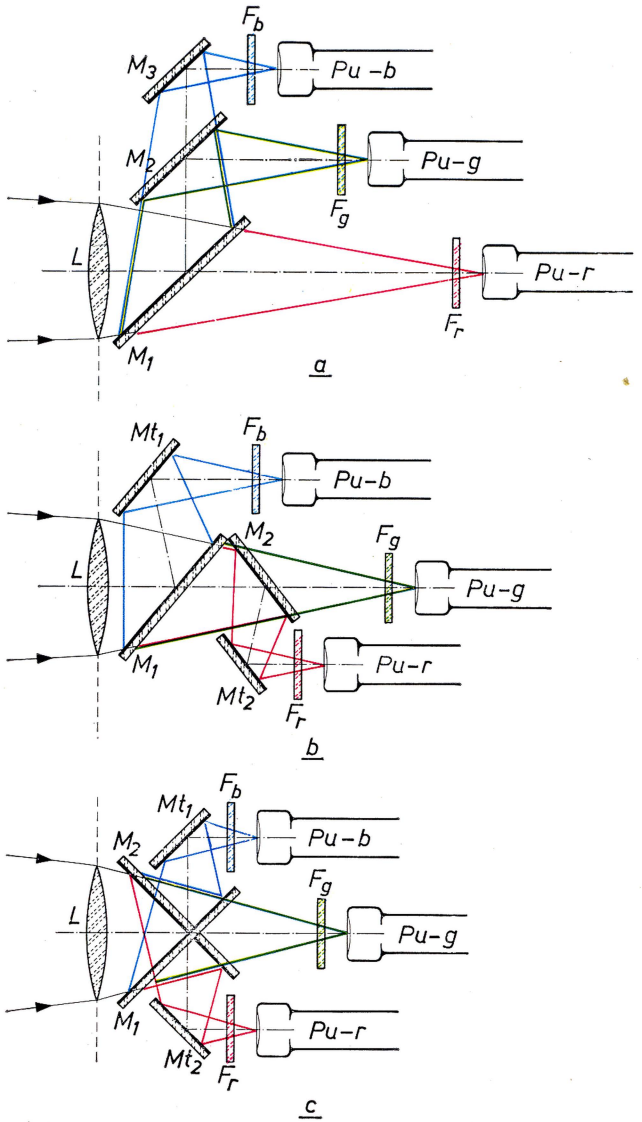


Fig. 10. Dispositions diverses des miroirs dichroïques. Pour les détails, voir le texte (page 38).

bleue sont plus élevées que celle de la lumière verte. Donc, lorsque nous disons que le flux lumineux est identique à la puissance lumineuse, cela suppose que l'oeil agit comme un appareil de mesure d'énergie; par suite, si nous voulons faire des mesures réellement objectives, les cellules photo-électriques doivent être munies de filtres colorés pour faire coïncider leurs caractéristiques avec la courbe de luminosité.

Une autre conséquence de tout cela est qu'un facteur de conversion de puissance lumineuse en puissance mécanique ne peut avoir de valeur fixe, mais doit dépendre de la longueur d'onde, à la manière de la courbe de luminosité. Comme nous l'avons déjà dit, le maximum de cette courbe se situe à peu près en 555 nm (vert), longueur d'onde pour laquelle une puissance mécanique de 1 W correspond à environ 680 lumens.

Indépendamment du flux lumineux émis par une source lumineuse et des intensités lumineuses dans diverses directions, les sources possèdent une troisième caractéristique très importante, la *luminance*. Cette grandeur désigne la quantité de lumière émise par centimètre carré de la surface éclairée, mesurée comme intensité lumineuse: l'unité est le *stilb* (sb), défini comme la luminance d'une surface ayant une intensité lumineuse de 1 candela par cm^2. Une autre unité internationale, utilisée comme sous-multiple, est le cd/m^2 (ou le *nit*), qui est la luminance d'une surface émettant 1 candela par mètre carré; on a donc 1 $cd/m^2 = 1 \cdot 10^{-4}$ sb. Dans les pays anglo-saxons, on utilise plus généralement le lambert-pied (foot-lambert); 1 lambert-pied = 3,43 $cd/m^2 = 3{,}43 \cdot 10^{-4}$sb. Donc, les sources lumineuses ayant une grande surface ont une luminance plus faible que les sources ponctuelles, dont la luminance élevée est la cause de l'éblouissement.

Les trois grandeurs dont nous venons de parler, l'intensité lumineuse, le flux lumineux et la luminance caractérisent ainsi les propriétés d'une *source lumineuse*, sans considérer la couleur de la lumière; on doit noter que par «sources lumineuses», on entend tous les corps ou surfaces qui émettent de la lumière, donc comprenant également les substances luminescentes qui tapissent l'écran des tubes-image des récepteurs de télévision.

Pour ces derniers tubes, une seule des grandeurs précédentes est réellement d'importance dans la pratique, la luminance, car elle est une indication directe de la sensation visuelle de brillance (ou encore d'éclat) que donnera l'écran. D'une façon générale, la luminance des tubes-image modernes est de l'ordre de 300 cd/m^2 (70 à 80 lamberts-pied).

Nous devons mentionner ici un autre terme utilisé en éclairagisme, l'*éclairement*. Celui-ci dépend du flux incident sur une surface; l'unité est le *lux* (lx), défini comme l'éclairement produit par mètre carré par un flux lumineux de 1 lm normal à la surface. Ce concept n'est pas lié à la sensation visuelle de brillance produite par une surface éclairée; cette sensation dépend aussi autant des propriétés réfléchissantes de la surface considérée. Dans ce contexte, ces propriétés (la réflectance) ne doivent pas être considérées à propos de surfaces plus ou moins spéculaires, mais plutôt en fonction de l'aptitude de la surface à réfléchir la lumière de toute longueur d'onde (peut-être diffusée dans toutes les directions) et à n'absorber qu'une faible part de la lumière. Une feuille de papier blanc, dont la réflectance est d'environ 70 à 80%, paraît beaucoup plus brillante lorsqu'elle est éclairée uniformément que, par exemple, un tissu de laine sombre, qui réfléchit moins de 10% de la lumière et absorbe le reste.

L'éclairement est la seule grandeur utilisée en éclairagisme qui peut être mesurée directement avec des cellules photoélectriques; c'est la raison pour laquelle les mesures d'éclairement servent presque toujours de base non seulement pour les recherches théoriques, mais aussi pour les travaux pratiques. Les posemètres utilisés par les amateurs photographes mesurent l'éclairement, bien qu'ils ne soient pas gradués en lux, mais en valeurs adaptées à leur but, c'est-à-dire en temps de pose. Egalement dans les studios cinématographiques, les luxmètres ou les posemètres sont d'usage constant; dans les studios de télévision en couleurs, en particulier, ils sont indispensables.

Ces considérations terminent notre discussion de la théorie des couleurs et nous allons maintenant passer aux applications à la télévision en couleurs.

CHAPITRE 2

APPAREILLAGE DE PRISE DE VUES DE TELEVISION EN COULEURS

Construction fondamentale

En appliquant le principe fondamental exposé précédemment, suivant lequel tout stimulus de couleur désiré, y compris le blanc, peut être produit par une combinaison convenable de trois sources de lumière, la réalisation théorique d'un système de télévision en couleurs ne soulève pas beaucoup de difficultés. La fig. 11 est un schéma synoptique très simplifié d'un système de télévision en couleurs en circuit fermé. Dans de tels circuits, la caméra, avec ses amplificateurs nécessaires, est reliée au récepteur par un câble dont la longueur n'est pas trop élevée; le signal de T.V. en couleurs n'est donc pas transmis en radiofréquence. La lumière pénétrant dans la caméra par l'objectif L est répartie par un système de miroirs à transmission partielle M_1, M_2 et le miroir redresseur M_3 sur trois tubes de caméra *PU-r*, *PU-g* et *PU-b*, dans lesquels la scène à téléviser est mise au point avec précision sur les photocathodes. Par l'interposition des filtres colorés *Fr*, *Fg* et *Fb* une sélection est

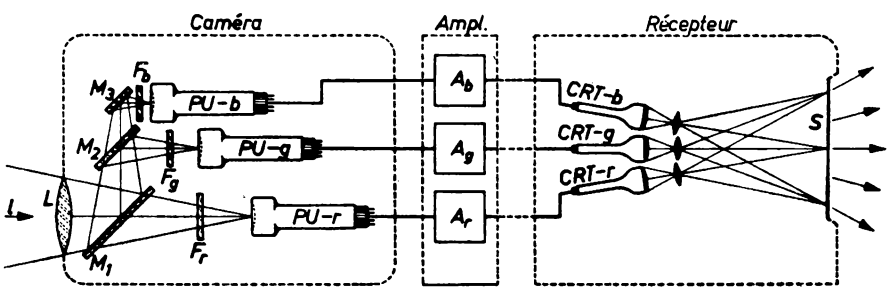


Fig. 11. Schéma synoptique d'un système de télévision en couleurs en circuit fermé. *Ab*, *Ag*, *Ar* = amplificateurs vidéo pour les canaux bleu, vert et rouge respectivement. *CRT-b*, *CRT-g*, *CRT-r* = tubes-image couleurs avec les substances luminescentes bleu, vert et rouge. *Fb*, *Fg*, *Fr* = filtres bleu, vert et rouge. L = objectif. M_1, M_2 = miroirs dichroïques. M_3 = miroir normal. *Pu-b*, *Pu-g*, *Pu-r* = tubes de caméra bleu, vert et rouge. S = écran translucide. l = lumière provenant de la scène télévisée.

effectuée en rapport avec les courbes $\bar{R}$, $\bar{G}$ et $\bar{B}$ de la fig. 8 pour chaque tube, d'après les longueurs d'onde présentes dans la lumière incidente, afin que les trois tubes reçoivent la somme instantanée des composantes $\bar{R}$, $\bar{G}$ et $\bar{B}$. Comme nous l'avons vu à la page 16, ces sommes de $\bar{R}$, $\bar{G}$ et $\bar{B}$ représentent les composantes rouge, verte et bleue totales R, G et B de la couleur considérée. En d'autres termes, avec R lumens de la couleur rouge de base, G lumens de la couleur verte de base et B lumens de la couleur bleue de base, la couleur à reproduire peut être mélangée en fonction de la nuance et de la luminosité. Il est évident que les couleurs des sources lumineuses utilisées doivent en fait correspondre à celles sur lesquelles la fig. 8 a été basée, c'est-à-dire à des longueurs d'onde de 700,0 — 546,1 et 435,8 nm. Toutefois, on remarquera qu'on utilise des couleurs de base différentes en télévision en couleurs, celles qui sont indiquées par R, G et B sur la fig. 9. Les corrections qui ont été apportées seront discutées plus loin.

De la sorte, l'un des tubes de caméra reçoit toutes les composantes rouges, un autre les composantes vertes et le dernier les composantes bleues de la lumière incidente. Les signaux vidéo fournis par les tubes résultant de l'analyse habituelle à séquence de lignes et que nous appellerons par la suite R, G et B, sont alors amplifiés pour être transmis vers le récepteur. Dans ce dernier, ces signaux commandent les faisceaux électroniques de trois petits tubes-image, dont les substances luminescentes sont choisies de telle sorte que leurs fluorescences se produisent pour les trois couleurs de base. Les trois images obtenues peuvent être projetées à l'aide de systèmes optiques convenables sur un écran translucide; un mélange additif se produit alors et la scène télévisée est reproduite dans ses couleurs naturelles. On peut ajouter que si l'on adoptait une forme aussi simplifiée, le système ne pourrait donner optiquement que de médiocres résultats, mais nous reviendrons sur ce point.

La caméra

Alors qu'en principe les caméras noir-et-blanc ne comportent que trois éléments fonctionnels:

a) un système optique,
b) un tube de caméra et
c) un préamplificateur,

une caméra en couleurs doit en avoir quatre:

a) un système optique,
b) un dispositif de séparation des couleurs,
c) trois tubes similaires de caméra et
d) trois préamplificateurs similaires.

Les fonctions du système optique, des tubes de caméras et des préamplificateurs sont en principe les mêmes que pour les caméras noir-et-blanc, mais l'élément additionnel de séparation des couleurs appelle quelques commentaires.

Le discriminateur de couleurs

Comme nous l'avons dit, les couleurs de base utilisées en télévision ne sont pas les mêmes que celles qui ont été normalisées par la C.I.E. en vue des recherches théoriques. Les couleurs indiquées à la page 18, dont les longueurs d'onde dominantes sont approximativement 615 nm (rouge), 532 nm (vert) et 470 nm (bleu), ont été adoptées pour la télévision, principalement pour obtenir le rendement maximal des substances luminescentes utilisées. Afin de correspondre à ces longueurs d'onde, les courbes de la fig. 8 ont eu à être adaptées; la méthode mathématique est analogue à celle qui permet de transformer un système de coordonnées en un autre dans le diagramme de chromaticité, ce qui nous donne les courbes de la fig. 12; dans ce cas également, comme dans la fig. 8, des valeurs négatives des trois composantes de base se produisent dans tout le spectre visible. Comme une lumière négative ne peut de toute façon pas exister, cela signifie que pratiquement il n'y a pas une seule couleur spectrale qui puisse être reproduite exactement, à l'exception du rouge de base (615 nm) utilisé comme couleur spectrale; cela était prévisible d'après le lieu des points de couleur des couleurs de base sur le diagramme de chromaticité de la fig. 9.

Le fait que la somme des trois composantes $\overline{R}'$, $\overline{G}'$ et $\overline{B}'$ est à nouveau égale à la valeur correspondante sur la courbe normalisée de luminosité pour toute longueur d'onde, prouve seulement la précision des calculs. Si les valeurs étaient indiquées verticalement en lumens au lieu de l'être en lm/W (ne tenant ainsi pas compte du rendement de conversion de l'énergie radiante en énergie lumineuse), la somme des trois composantes serait la même pour toutes les longueurs d'onde (voir la fig. 6).

En règle générale, les courbes telles que celles de la fig. 12a sont tracées

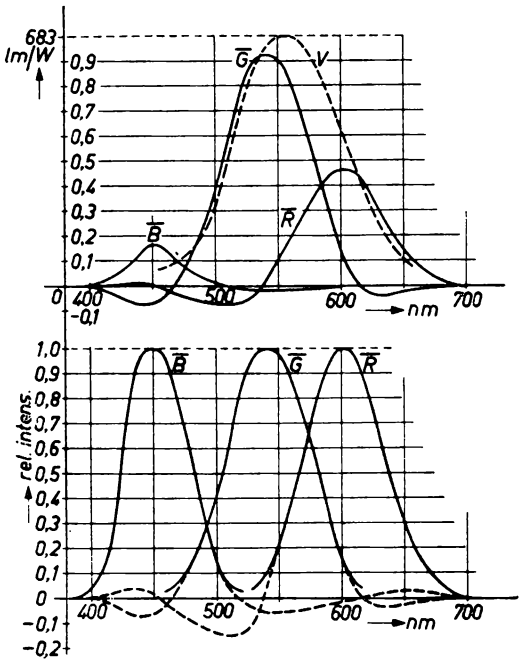


Fig. 12. Coordonnées chromatiques des longueurs d'onde spectrales des couleurs primaires formant la base de la télévision en couleurs.
a) valeurs relatives; la ligne tiretée *V* représente la courbe de luminosité relative.
b) courbes normalisées à l'unité.

en fait d'après la manière utilisée pour la fig. 12b, c'est-à-dire où les valeurs maximales représentent l'unité. Cette méthode ne convient pas très bien pour des considérations théoriques, mais elles sont très efficaces dans la pratique, notamment pour l'établissement des miroirs et des filtres, pour le discriminateur de couleurs, de même que pour les circuits d'amplification, de commande et de fonctionnement.

Pour la même raison, cette normalisation des valeurs maximales n'est pas seulement utilisée sur le papier, mais également pour les travaux pratiques; en d'autres termes, en amplifiant les signaux de différentes intensités des tubes de caméras sur ce principe, leurs valeurs maximales sont égalisées. Cela est réalisé en partie dans la caméra, par réglage convenable des points de fonctionnement des tubes de caméras ou des préamplificateurs, mais l'égalisa-

tion finale n'est pas effectuée avant que les signaux atteignent l'un des premiers étages des amplificateurs correcteurs. A partir de la sortie de ces très importants amplificateurs et de là à l'entrée des récepteurs par les circuits principaux de transmission, il y a alors à tenir compte de trois signaux de couleur *R*, *G* et *B*, ayant tous la même valeur maximale.

En principe, il est naturellement possible de régler les tensions de signal sur cette valeur pour toute couleur donnée pas trop saturée mais, pour des raisons évidentes, on a été amené à faire un tel réglage avec un objet blanc placé devant la caméra (mire noir-et-blanc). Dans ce cas, il suit d'après les courbes de la fig. 12 que les trois signaux atteindront les valeurs maximales absolues, par suite de la distribution uniforme d'énergie spectrale dans la lumière blanche; ces valeurs maximales possibles doivent être déterminées de façon très précise si l'on veut obtenir le rendement maximal de tout le réseau de transmission.

Il est évident que les rapports d'intensités des trois signaux de couleur modifiés comme nous venons de le dire doivent être restitués avant d'attaquer les trois tubes-image à l'extrémité de la ligne de transmission, chacun de ces tubes étant fluorescent dans une couleur particulière.

Comme on peut le calculer sur la base des valeurs trichromatiques (voir page 15), 1 lm de blanc peut être obtenu avec 0,30 lm du rouge de base, 0,59 lm du vert de base et 0,11 lm du bleu de base*).

Les trois signaux de couleur, reçus à leur valeur maximale, c'est-à-dire dans le rapport 1 : 1 : 1, doivent donc être réduits dans le récepteur au rapport de 0,30 : 0,59 : 0,11, sans oublier que cette réduction doit tenir compte non seulement des différences de rendement des substances luminescentes utilisées, mais aussi des différences de linéarité des caractéristiques des trois systèmes de canons électroniques. Les tensions de commande nécessaires à la reproduction du blanc avec les substances luminescentes utilisées à l'heure actuelle sont approximativement dans le rapport 0,40 *R* : 0,34 *G* : 0,26 *B*. Comme on le verra dans les paragraphes suivants, le rapport théorique 30 : 59 : 11 est important sous plusieurs aspects.

D'après les courbes de la fig. 12b (traits pleins), nous voyons qu'en pratique

---

*) Le même résultat pourrait être obtenu en comparant les valeurs sur les courbes *R'*, *G'* et *B'* de la fig. 12b correspondant aux couleurs primaires. Par «couleurs primaires», nous entendons, ainsi que dans les chapitres suivants de cet ouvrage, les couleurs adoptées pour la télévision en couleurs.

ni les parties négatives des trois courbes, ni les bandes de «transmission secondaire» dans le rouge et le bleu n'ont à être prises en considération; de plus, au voisinage de l'axe zéro, les courbes sont relativement imprécises. En pratique, les écarts des valeurs théoriques dans cette zone de faibles intensités ne sont pas appréciables dans la couleur. Il est de plus grande importance de se fixer aux courbes théoriques dans les régions où deux courbes se chevauchent, c'est-à-dire entre 480 et 500 nm et même plus entre 550 et 600 nm, zones où les teintes de la peau et autres nuances faciales sont reproduites. En rapport avec le zones de «transmission» dont nous avons parlé, on se souviendra également que, comme nous l'avons dit à propos de la fig. 11, les longueurs d'onde des composantes de la lumière incidente doivent être réparties entre les trois tubes de caméras en accord avec les courbes $\overline{R}'$, $\overline{G}'$ et $\overline{B}'$ au moyen de filtres. Ces courbes peuvent donc être considérées comme les courbes de transmission pour les trois filtres colorés. En pratique, cette assertion doit être corrigée, pour autant que les caractéristiques de transmission des trois canaux sont déterminées, non seulement par

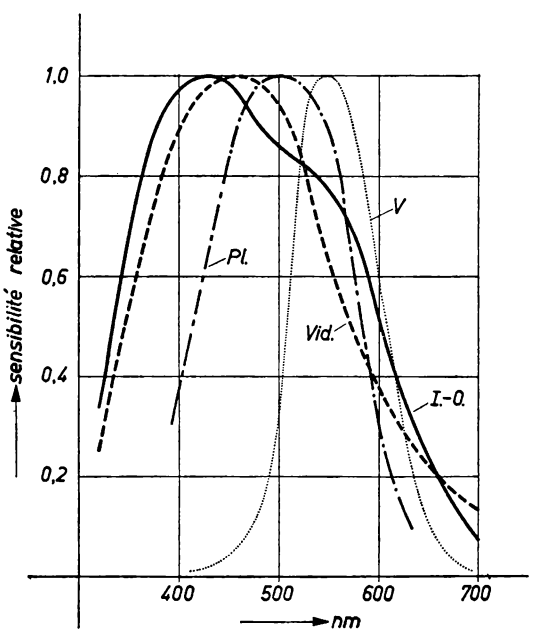


Fig. 13. Caractéristiques spectrales de l'image-orthicon, du Vidicon et du Plumbicon. V = courbe de luminosité relative

celles des filtres, mais aussi par les caractéristiques spectrales des tubes de caméras et des miroirs à transmission partielle. Cela signifie que les courbes obtenues en multipliant les valeurs relatives des caractéristiques des filtres, tubes et miroirs respectifs pour chaque canal individuel doivent correspondre aux courbes $\overline{R}'$, $\overline{G}'$ et $\overline{B}'$ de la fig. 12b. En exemple, la fig. 13 donne les caractéristiques spectrales de l'image-orthicon, du Vidicon et du Plumbicon, les trois types de tubes de caméras utilisés à l'heure actuelle pour la télévision en couleurs.

Miroirs dichroïques

Nous venons de faire allusion à l'attention que l'on devait porter aux caractéristiques spectrales des miroirs à transmission partielle. Il ne s'agit pas d'une application fortuite, ou pour cela indésirable mais d'une application qui a évolué depuis les débuts de la télévision en couleurs afin d'avoir une distribution convenable de la lumière incidente entre les trois tubes de caméras, ce que nous allons maintenant examiner.

Sans cette propriété sélective des couleurs des miroirs (dichroïsme), la distribution dans les trois canaux représentée schématiquement à la fig. 11 pourrait être indiquée de telle sorte que le miroir à transmission partielle M_1 transmette, disons 1/3 de la lumière incidente et en reflète 2/3 au miroir suivant M_2; si ce dernier ne devait transmettre que 50% et réfléchir 50%, chaque canal ne recevrait qu'un tiers de la lumière incidente. Cela veut dire qu'au plus 1/3 de la lumière de chacune des trois composantes des couleurs rouge, vert et bleu, atteindrait les tubes de caméras pour conversion en énergie électrique (signaux vidéo), les 2/3 restants étant absorbés par les deux autres filtres.

Cependant, si le miroir M_1, par exemple, était réalisé pour ne réfléchir que la partie du spectre comprise au-dessous de 570 nm environ (c'est-à-dire les composantes verte et bleue), mais pour transmettre les ondes plus longues de la partie rouge du spectre avec un minimum de pertes, le résultat serait très différent. Nous dirons plus loin comment on peut y arriver exactement; pour l'instant, il nous suffira de dire que l'on peut régler à volonté les zones où se produisent la réflexion et la transmission, brusquement ou graduellement, y compris la manière représentée par la courbe M_{gb} dans la fig. 14a. De tels miroirs sont dits *dichroïques*.

Le miroir M_2 est aussi du type dichroïque, ayant une caractéristique de la

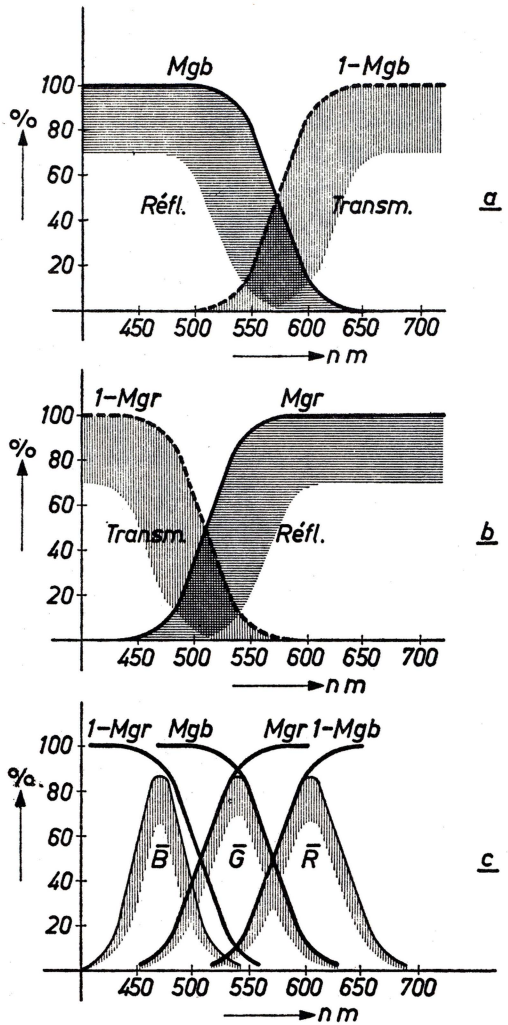


Fig. 14. Caractéristiques spectrales des miroirs dichroïques.

a) miroir réfléchissant vert et bleu, dont la courbe de réflectance est M_{gb}; la courbe de transmittance est approximativement 1 — M_{gb}.

b) miroir réfléchissant vert et rouge, dont la courbe de réflectance est M_{gr}; la courbe de transmittance est approximativement 1 — M_{gr}.

c) effet produit en faisant se succéder les deux miroirs sous un angle de 45°; les hachures indiquent les courbes de transmission désirées R, G et B pour les canaux rouge, vert et bleu.

sorte indiquée par la courbe M_{gr} de la fig. 14b. Ce miroir réfléchit la partie verte du spectre (la partie rouge ayant été éliminée par le miroir M_1), et transmet la partie bleue, sans pertes, au miroir M_3. Ce miroir n'est pas dichroïque et sert uniquement à diriger la lumière vers le tube de caméra «bleu». La fig. 14c montre la distribution spectrale dans les trois canaux telle qu'elle est due aux miroirs; la courbe $(1 - M_{gb})$ est relative au canal rouge, le canal vert est compris entre les courbes M_{gb} et M_{gr} et la courbe $(1 - M_{gr})$ limite le bleu.

Si l'on compare ces dernières aux courbes théoriques de transmission $\overline{R}'$, $\overline{G}'$ et $\overline{B}'$ tracées sur le même diagramme, on voit qu'un léger filtrage est suffisant pour que les courbes respectives soient en accord. Théoriquement, plus de 80% de la lumière incidente atteignent donc les tubes de caméras.

De plus, pour éviter toute erreur possible de compréhension, on doit noter que ce rendement ne peut être atteint que si la lumière incidente comprend au plus trois longueurs d'onde spectrales (ou de petites bandes de longueurs d'onde), c'est-à-dire celles pour lesquelles les courbes de transmission atteignent leur maximum. Toutefois, si la lumière tombant sur le système discriminateur des couleurs a un spectre continu de plus ou moins égale énergie, comme il en est habituellement le cas, chaque canal de couleur reçoit au plus 1/3 de l'énergie incidente totale. De plus, comme la distribution d'énergie est quelque peu limitée en accord avec les courbes de transmission, il ne reste que 1/5 ou 1/6 de l'énergie originale. Si nous tenons compte aussi du fait que ni les miroirs dichroïques ni les filtres colorés ne sont complètement exempts de pertes, les tubes de caméras ne reçoivent finalement que de maigres 12 à 15% de la lumière incidente.

Dans l'état actuel du progrès, les caméras de télévision en couleurs équipées des mêmes tubes que pour le noir-et-blanc n'ont, d'un point de vue purement théorique, qu'une sensibilité de 1/7 à 1/8 de celle des caméras noir-et-blanc. Alors que pour les studios de télévision en noir et blanc on se contente de niveaux d'éclairement de 500 à 1000 lux, l'éclairement élevé désagréable de 4000 à 6000 lux est inévitable pour la couleur.

Le fonctionnement des miroirs dichroïques est basé sur le phénomène d'interférences dû aux ondes lumineuses traversant des milieux optiques très minces.

Un phénomène du même genre a été naturellement connu au cours des âges, ne serait-ce que par la diversité des couleurs dans les bulles de savon

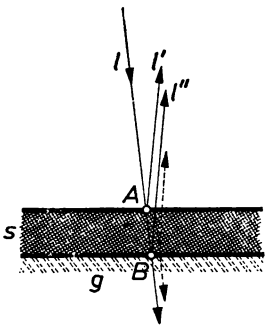


Fig. 15. Réflexion de la lumière par une couche interférentielle mince. l = rayon lumineux incident; l', l'' = rayons réfléchis; g = miroir de verre; s = couche interférentielle dont l'épaisseur est d'environ 1/4 de la longueur d'onde de la lumière; A = entrée du rayon incident; B = point d'émergence de la couche.

ou par une huile surnageant sur l'eau ou, pour prendre un exemple plus moderne, les *anneaux de Newton* produits entre une diapositive en couleurs et sa lamelle de verre de protection. La fig. 15 montre schématiquement, agrandies environ 10 000 fois, le mécanisme de ces franges d'interférence. Lorsqu'un rayon lumineux tombe presque perpendiculairement sur la surface (point *A*) d'une couche très mince d'un milieu ayant des propriétés optiques et de préférence une réfraction élevée, une partie de la lumière est réfléchie (rayon *l'*). La lumière incidente résiduelle traverse le milieu (point *B*) et, si elle tombe ensuite sur un verre à indice de réfraction plus faible que celui du milieu, une réflexion se produit à nouveau: un rayon *l''* est réfléchi vers l'entrée. Si nous supposons maintenant que la longueur d'onde du rayon soit de 700 nm et que l'épaisseur de la couche ne soit que de 1/4 de celle-ci, c'est-à-dire 175 nm (plus exactement, la couche serait alors $175/n$, n étant le facteur de réfraction du milieu optique), la différence de longueurs d'onde entre les rayons *l'* et *l''* sera exactement égale à la moitié de la longueur d'onde, ce qui correspond à un déphasage de 180°. De la même façon, si une réflexion a lieu à partir d'un milieu optiquement plus faible (facteur plus faible de réfraction), il y a aussi un déphasage de 180°, de sorte qu'en présence de telles conditions, le rayon *l''* (réflexion en *B*) émerge avec un déphasage total de 360°, c'est-à-dire *en phase* avec le rayon *l'*. Il en résulte que la réflectance de la surface est plus élevée pour la lumière de 700 nm.

On peut facilement calculer que pour une lumière spectrale de, disons la moitié de cette longueur d'onde (350 nm), laquelle est une lumière violette à peine visible, la différence de longueur d'onde entre *l'* et *l''* serait égale à la longueur d'onde totale et que, par suite de la réflexion concomitante en *B*

(laquelle est en opposition de phase), le rayon *l″* émerge en *A en opposition de phase* avec *l′*. Ainsi, pour une longueur d'onde de 350 nm, la réflectance de la surface est plus faible. Un calcul simple montre que, suivant une certaine loi, la réflectance diminue d'un maximum à 700 nm jusqu'à un minimum à 350 nm. Un tel miroir est ce que nous appelons un miroir *à réflexion rouge*, sous sa forme la plus simple cependant. Il présenterait un effet exactement opposé si, après avoir traversé le milieu mince, le rayon *l* tombait au point *B* sur un verre à indice de réfraction plus élevé; la réflexion partielle sur ce point ne subirait pas le déphasage de 180°. Les rayons émergents *l′* et *l″* en *A* seraient en opposition de phase en 700 nm, mais en phase en 350 nm et l'on aurait un miroir dichroïque *à réflexion bleue*.

Nous irions au-delà du but de ce livre si nous agrémentions les explications schématiques précédentes d'autres détails théoriques et pratiques, qui sont néanmoins très importants, tels que l'effet de plus d'une réflexion sur les deux interfaces (ligne tiretée sur la fig. 15) ou d'une lumière incidente oblique; ce dernier cas se présente dans la caméra couleurs, mais il nous suffira de dire que le principe du miroir n'en est pas affecté, car la caractéristique spectrale est simplement déplacée vers les ondes plus courtes du spectre. Toutefois, si l'angle est trop grand, une polarisation se produit, ce qui provoque une perte de lumière. On doit tenir compte des deux effets ci-dessus si les miroirs sont montés après des objectifs à grande ouverture (fig. 16), des différences notables dans les couleurs pouvant se manifester entre les deux côtés de l'image; ces différences peuvent être compensées en partie en diminuant graduellement l'épaisseur de la couche.

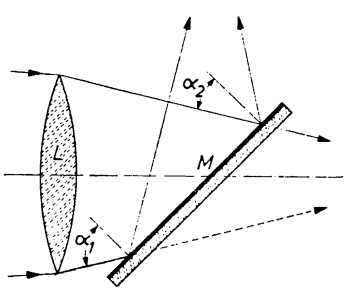


Fig. 16. Les angles d'incidence α_1 et α_2 sur les côtés gauche et droit des miroirs dichroïques *M* ne sont pas égales, de sorte que les propriétés sélectives ne sont pas les mêmes. *L* = objectif.

A l'époque où l'on procédait aux premières expériences de télévision en couleurs, les seuls miroirs disponibles étaient du type alors utilisé dans d'autres appareillages optiques, tels que les télémètres photographiques. La meilleure substance pour la très mince couche interférentielle nécessaire était une feuille d'or, mais elle donnait lieu à une perte considérable de lumière. Toutefois, l'évolution et les derniers perfectionnements des techniques de vaporisation sous vide qui ont eu lieu au cours des vingt dernières années ont permis, non seulement de réaliser des revêtements de substances optiques de haute qualité pratiquement sans pertes mais, ce qui est encore plus important, de pouvoir superposer plusieurs couches les unes sur les autres. Or, si de tels revêtements ont alternativement des facteurs de réfraction faibles et élevés, on peut obtenir à volonté presque toutes caractéristiques spectrales désirées. D'une façon générale, la caractéristique est d'autant plus raide que le nombre de couches est plus élevé. Pour une courbe telle que celle de la fig. 14, on a habituellement besoin de sept couches; dans ce cas, les réflectances maximales sont supérieures à 90% et les pertes par absorption négligeables. Parmi les substances utilisées pour les couches, on trouve le sulfure de zinc et la cryolite. Il peut être intéressant d'ajouter que l'application des couches interférentielles est aujourd'hui un procédé normal dans la fabrication des objectifs de haute qualité (objectifs traités), non pas pour leur donner du dichroïsme, mais pour minimiser les réflexions.

Réalisation pratique du discriminateur de couleurs

Le discriminateur de couleurs indiqué à la fig. 11 est représenté plus en détail à la fig. 10a (v. page 24). On notera cependant que cette disposition purement théorique présente en pratique l'inconvénient de nécessiter une trop grande distance entre l'objectif et les tubes de caméra. Pour qu'une image nette soit formée sur chacun des tubes, tous doivent être à la même distance de l'objectif, ce qui dépend du plus éloigné, dans ce cas le bleu. La disposition de la fig. 10b (v. page 24) est plus efficace; ici, le miroir dichroïque M_1 ne reflète que la partie bleue du spectre, qui passe ensuite au tube caméra correspondant par l'intermédiaire d'un miroir déflecteur Mt_1 et d'un filtre correcteur F_b. Les bandes spectrales rouge et verte de la lumière incidente parviennent par M_1 au miroir dichroïque M_2, qui reflète le rouge et transmet tout le vert. Ainsi, alors qu'après avoir traversé le filtre correcteur de vert F_g

la lumière verte tombe directement sur le tube de caméra *PU-g*, le rouge est défléchi par Mt_2 avant d'atteindre le tube de caméra *PU-r* par l'intermédiaire de *Fr*. Si l'on se rapporte à la fig. 10a, on voit que la distance de l'objectif aux tubes de caméra est devenue beaucoup plus courte.

Cette distance peut être à nouveau réduite en croisant les miroirs comme l'indique la fig. 10c. Le lecteur verra par lui-même qu'en dépit des miroirs croisés, le résultat est identique à celui de la fig. 10b. Toutefois, un tel arrangement nécessite la plus grande précision possible dans la position des miroirs, du fait que la plus légère erreur angulaire, ou même un déplacement parallèle des miroirs impliquerait des images doubles. Cette méthode n'est donc utilisée que dans les analyseurs à flying-spot pour les diapositives et le télécinéma, pour lesquels il ne s'agit pas d'avoir une reproduction fouillée de scènes réelles sur les tubes de caméra, mais plutôt de concentrer la lumière passant par un élément d'une diapositive ou d'un film sur un photomultiplicateur*). Dans les caméras de prises de vues directes, le système de la fig. 10b est universellement adopté.

A la suite des progrès les plus récents, les miroirs individuels ont été remplacés par des prismes de verre joints (fig. 17); les couches dichroïques sont appliquées sur les interfaces, non seulement pour protéger les couches interférentielles sensibles de l'atmosphère et des poussières, mais plus spécialement en vue de réduire encore plus la distance entre l'objectif et le tube. Nous allons maintenant voir comment on y parvient.

Objectifs de caméra; lentilles auxiliaires

Le besoin de réduire le plus possible la distance entre l'objectif et les tubes de caméra, dont nous avons parlé à plusieurs reprises, est né de ce qui suit. Tout objectif a une distance caractéristique pour laquelle les sujets «à l'infini» sont reçus très nettement, cela s'appliquant également avec une précision suffisante aux sujets qui sont éloignés de plus que quelques mètres; c'est la *distance focale* de l'objectif. Elle n'est pas mesurée à partir de la face avant ou arrière de l'objectif, mais d'un plan théorique dit *plan principal*, qui ne coïncide avec l'axe de symétrie que dans le cas d'une simple lentille biconvexe (fig. 18a). Dans les systèmes optiques modernes, qui ont été amenés à un

*) Voir également: W. A. Holm, *Télévision sans mathématiques*, p. 78.

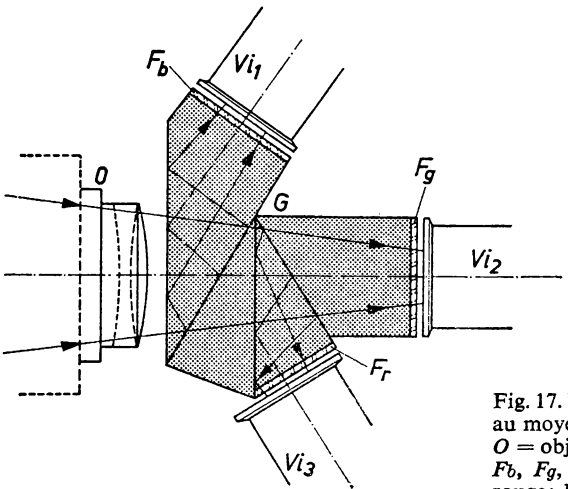


Fig. 17. Décomposition des couleurs au moyen de prismes de verre.
O = objectif; G = bloc des prismes; Fb, Fg, Fr = filtres bleu, vert et rouge; Vi_1, Vi_2, Vi_3 = vidicons.

degré élevé de perfection, le lieu du plan principal (ou dans certains cas de deux d'entre eux) peut être situé en tout point dans des limites assez larges, suivant le but poursuivi pour le système, soit en avant, soit en arrière de l'objectif (par exemple, téléobjectifs, objectifs grands angulaires; voir les fig. 18b et c). Cette position variable du plan principal est en rapport avec la «dimension des montures» (tirage mécanique), qui a été normalisée pour permettre l'interchangeabilité des objectifs photographiques et cinématographiques. Cette dimension est la distance du film (plan image) à l'épaulement de la monture de l'objectif (distance *a* dans la fig. 18b). Indépendamment de cela, tout système optique a une dimension, spécialement importante en télévision, dite distance utile (tirage optique); c'est la distance du film au plan-limite de l'objectif qui en est le plus proche. Par suite, cette distance est toujours inférieure à la dimension de monture (dimension *b* dans les fig. 18b et c).

Même malgré toute la mathématique, il n'est pas possible de situer le plan principal en tout point au hasard qui pourrait convenir au-delà de l'objectif; le choix est toujours limité par le rapport qui existe entre ce plan et la distance focale de l'objectif. Indépendamment de cette raison, il y a aussi un certain rapport entre les distances focale et utile; il serait à peine possible sur le plan pratique de réaliser un bon objectif à grande ouverture pour une distance utile environ double de la distance focale, ce qui est pourtant requis

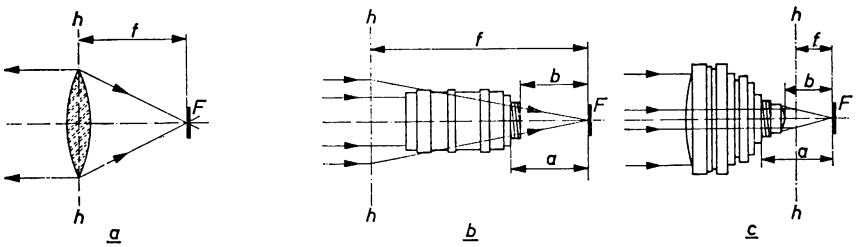


Fig. 18. Distances focales et plan principal des objectifs ou lentilles.
a) lentille biconvexe.
b) téléobjectif (grande distance focale).
c) objectif grand angulaire (courte distance focale).
a = dimension de monture (tirage mécanique); b = dimension utile(tirage optique); f = distance focale; $h - h$ = plan principal; F = plan image (film).

pour une caméra T.V. en couleurs, du fait que le discriminateur de couleurs doit être logé dans l'espace séparant l'objectif du plan-image. Dans les caméras à image-orthicon, cela impliquerait de 35 à 40 cm. En fait, il existe bien des objectifs d'aussi grandes distances utiles, mais ils ont une ouverture relativement faible et, étant donnée leur distance focale élevée qui leur fait donner une perspective «télescopique», sont sans utilité pour le travail en studio.

Jusqu'à une date récente, il avait été possible de concilier ces conditions apparemment incompatibles d'une grande distance utile et d'une courte distance focale par adjonction d'une lentille auxiliaire. La fig. 19 montre schématiquement un système de ce genre, tel qu'il est utilisé de nos jours dans les caméras de studio aux Etats-Unis et au Japon.

Un objectif à grande ouverture de haute qualité (O), sélectionné parmi les nombreux modèles d'objectifs de caméras 35 mm, produit une image fouillée de la scène sur son plan focal normal $(a - a)$. S'il n'y avait pas une lentille L_f sur ce plan, l'image n'existerait que dans l'air et, au-delà, les rayons lumineux de l'objectif O, convergeant vers le plan focal, deviendraient divergents. Un deuxième système optique R, également de haute qualité (représenté par deux éléments sur la figure), placé après l'image à une distance égale à deux fois sa distance focale, reproduit cette image exactement à la même dimension en un point plus éloigné, également à deux fois la distance focale, où elle tombe sur la photocathode de l'image-orthicon. Ce système additionnel R, dont le seul but est de déplacer l'image originale d'une cer-

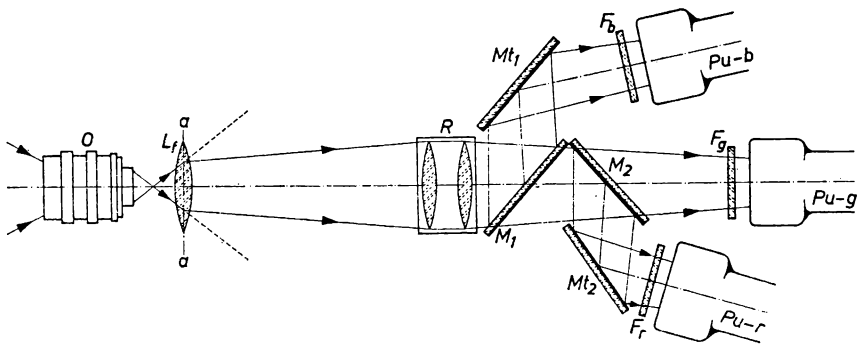


Fig. 19. Système de décomposition des couleurs à lentille auxiliaire.
O = objectif; Fb, Fg, Fr = filtres bleu, vert et rouge; L_f = lentille de champ; M_1, M_2 = miroirs dichroïques bleu et rouge; Mt_1, Mt_2 = miroirs plans; *Pu-b*, *Pu-g*, *Pu-r* = image-orthicons pour les canaux bleu, vert et rouge; R = lentille auxiliaire; a — a, plan image de l'objectif.

taine distance, constitue le *système optique auxiliaire* (ou relais). Il n'est en général pas difficile de trouver un système pour lequel le double de la distance focale serait suffisant pour loger le discriminateur de couleurs (30 à 35 cm), mais il en va différemment si l'on veut un rapport d'image 1 : 1 et le système auxiliaire est alors constitué en fait par deux systèmes analogues de haute qualité placés côte à côte.

La lentille simple L_f dans le plan image de l'objectif principal sert à concentrer les rayons divergents de la lumière dans le grand angle en arrière de l'image dans l'air (ligne tiretée sur la fig. 19) et à les transmettre en totalité à la lentille auxiliaire. Sans cette lentille «de champ», la rapidité de la lentille auxiliaire devrait être au moins deux fois plus élevée que celle de l'objectif principal, ce qui serait impossible.

D'autres types de systèmes auxiliaires conviennent également, par exemple avec leurs éléments séparés en deux parties entre lesquelles le système de miroirs est intercalé, mais dans ce cas, la section arrière doit être séparée en trois parties, étant donné que les miroirs fournissent trois faisceaux lumineux.

Indépendamment de l'encombrement du système auxiliaire, celui-ci souffre également de l'inconvénient résultant du fait que dans un excellent système, parfaitement corrigé, la lumière qui pénètre dans l'objectif principal doit

traverser 30 (ou plus) interfaces verre-air avant d'arriver sur la photocathode et, malgré la haute qualité des objectifs modernes, un si grand nombre de transitions n'est pas sans affecter la qualité de l'image. L'intensité lumineuse nette est réduite de plus de moitié et, de plus, l'image perd beaucoup de ses contrastes et de sa netteté du fait des nombreuses réflexions inévitables.

Ce n'est que tout récemment qu'on a réussi à mettre au point un système moins compliqué et plus efficace, dû en grande partie au fait que les grands fabricants de matériels optiques utilisent maintenant des calculatrices électroniques qui leur ont permis en un temps relativement court et sans grands frais, de répondre aux desiderata de l'industrie de la télévision. On connaît un objectif pour le format vidicon 9 × 12 mm, ayant une distance focale de 8 cm et une ouverture *f*/1,4 qui a permis de réaliser une caméra T.V. couleurs (E.M.I.) de rapidité inhabituelle. Le discriminateur de couleurs est placé en avant du système optique (fig. 20), ce qui signifie que celui-ci est constitué en fait par trois éléments, qui doivent naturellement être absolument identiques. En disposant des lentilles convergentes ou divergentes de diamètre suffisamment grand en avant du système réfléchissant, la distance focale effective de la caméra peut être à volonté réduite à 2,5 cm ou portée à 16 cm.

Pour une autre caméra à vidicon (Philips), on a réalisé des objectifs à focale variable et de haute qualité (S.O.M.-Berthiot et P. Angénieux), convenant particulièrement pour un discriminateur, non pas à miroirs, mais à un dispositif à prismes comme celui dont nous venons de parler. L'avantage du système prismatique entre l'objectif et le tube de caméra est que le faisceau convergent qui sort du premier ne se concentre pas de façon égale dans le verre et dans l'air, ce qui a pour résultat un agrandissement de la longueur utile sans faire varier la distance focale. Cet agrandissement est approximativement proportionnel au facteur de réfraction de l'assemblage des prismes,

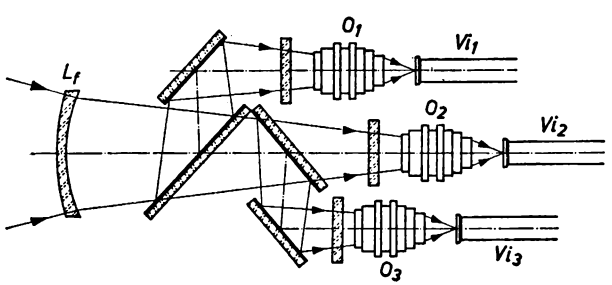


Fig. 20. Décomposition des couleurs en avant de l'objectif.
O_1, O_2, O_3 = objectifs identiques; L_f = lentille permettant de faire varier la distance focale; Vi_1, Vi_2, Vi_3 = vidicons pour les canaux bleu, vert et rouge.

soit à peu près 1,5. Dans la caméra en question, cet assemblage constitue un bloc très compact, comprenant les couches dichroïques et les filtres correcteurs, la longueur totale hors tout n'étant pas supérieure à 70 mm environ.

Nous venons de parler des principaux détails physiques de la caméra couleurs, c'est-à-dire du système optique et du discriminateur et nous allons maintenant discuter la partie électronique.

Les tubes de caméras

Nous avons déjà dit que seuls l'image-orthicon et le Vidicon étaient utilisés pour la télévision en couleurs. Le premier est utilisé en studios dans les pays où existe un réseau public de télévision en couleurs, c'est-à-dire pour l'instant aux Etats-Unis et au Japon. Le Vidicon qui, du fait de son principe de fonctionnement, est un peu lent, ne convient pas très bien aux scènes aux mouvements rapides, donc à un bon travail en studio; on l'utilise surtout en télévision scientifique et industrielle. Etant donnée la sensibilité élevée des tubes de prises de vues, les caméras à image-orthicon donnent de bonnes images avec des niveaux d'éclairement après tout non intolérables de 3000 à 6000 lux, mais leur emploi est très délicat, indépendamment de leurs dimensions et de leur poids, étant invariablement munies d'un encombrant discriminateur à optique auxiliaire. Par contraste, les caméras à Vidicon, spécialement lorsqu'elles sont équipées des systèmes optiques les plus modernes comme ceux que nous avons décrits, sont de dimensions et de poids comparables aux caméras classiques pour noir-et-blanc; elles sont aussi beaucoup plus faciles à manipuler, du fait de leur principe plus simple de fonctionnement. Bien qu'il n'ait pas encore été possible de surmonter l'inconvénient mentionné plus haut de l'inertie et la nécessité d'un éclairement très intense, ce qui s'oppose au travail en studio, le Vidicon est le mieux adapté pour les utilisations scientifiques et industrielles, où les niveaux d'éclairement très élevés ne présentent généralement pas d'inconvénients. C'est ainsi que pour l'enseignement médical et chirurgical, en particulier, la caméra couleurs à Vidicon joue un rôle dominant, au moins dans l'état actuel de la technique. Pour être complets il nous faut dire que pendant ces dernières années un nouveau tube de caméra a été mis au point, le Plumbicon, spécialement destiné pour la télevision en couleurs. Son fonctionnement et son utilisation sont aussi simples que ceux du Vidicon, mais contrairement à celui-ci, le

Plumbicon n'a aucune inertie et de plus a pratiquement la même photosensibilité que l'image orthicon.

Il ne nous paraît pas ici nécessaire d'insister sur le fonctionnement de l'image-orthicon et du vidicon, ou encore sur leurs circuits associés, les sources d'alimentation, la déflexion du faisceau électronique, le blanking, etc., lesquels reposent sur les mêmes principes que pour le noir-et-blanc, mais il faut souligner que les réglages et les commandes doivent être encore plus précis et plus constants au fur et à mesure que le temps s'écoule. En effet, on se souviendra qu'on doit régler trois tubes de caméras avec une précision inhabituelle en fonction du balayage et d'autres caractéristiques; même le plus petit écart dans cette adaptation exacte se produisant en cours de fonctionnement suffit à donner lieu immédiatement à des différences, soit dans la reproduction des couleurs, soit dans la superposition précise des trois images primaires individuelles sur l'écran du récepteur.

Les défauts de ce genre se produisent si les trois signaux vidéo diffèrent des valeurs théoriques correctes, ce qui résulte du principe de fonctionnement du discriminateur de couleurs, mais, supposant que le système fonctionne normalement, ces valeurs peuvent être réglées facilement; toute mire noir-et-blanc donnée télévisée par la caméra doit donner des amplitudes égales des signaux vidéo *R*, *G* et *B* (voir page 30) sur l'oscilloscope de contrôle qui accompagne toute caméra couleurs. Lorsqu'ils sont appliqués au récepteur, ces trois signaux vidéo doivent alors donner sur l'écran une image noir-et-blanc pure, sans la moindre suggestion d'une teinte intermédiaire. Comme il a été expliqué dans un paragraphe précédent (voir page 31), ce résultat est obtenu tant que les intensités lumineuses des substances luminescentes pour les trois couleurs de base sont dans le rapport 30 (rouge): 59 (vert) : 11 (bleu) en tout point de la mire reproduite. Lorsque les trois signaux sont égaux et en tenant compte des différences de rendement des substances luminescentes, il faut que les trois amplificateurs vidéo du récepteur soient réglés de telle sorte que les trois produits du gain par les trois rendements des substances soient également dans le rapport 30 : 59 : 11 pour les trois canaux.

Une fois ce réglage obtenu, tout mélange de couleurs donné sera automatiquement reproduit avec la plus grande exactitude, en supposant naturellement que le rendement des amplificateurs intermédiaires du système de transmission entre les tubes de caméras et le tube-image du récepteur (et ces tubes eux-mêmes) reste constant. Notons pour terminer que le contrôle

des amplitudes des signaux vidéo au moyen de l'oscilloscope de contrôle ne peut être assuré de façon continue en cours de transmission; il ne peut l'être que lorsqu'un objet blanc brillant apparaît dans la scène télévisée, donnant alors lieu à des signaux maximaux égaux pour les trois canaux.

Le gamma total du système

Indépendamment du gain constant des amplificateurs, que l'on obtient par les méthodes usuelles de stabilisation des tensions d'alimentation et par l'emploi de contre-réaction entre étages, une autre condition aussi importante pour garantir l'absence de défauts dans les couleurs est une linéarité parfaite des trois réseaux amplificateurs entre les tubes de caméras et le tube-image.

Dans un amplificateur, la linéarité implique une proportionnalité constante entre les signaux d'entrée et de sortie depuis les plus petites amplitudes jusqu'aux amplitudes maximales admissibles. En ce qui concerne les tubes de caméras et les tubes-image, la linéarité implique la proportionnalité, d'une part entre le flux lumineux tombant sur la photocathode et le courant

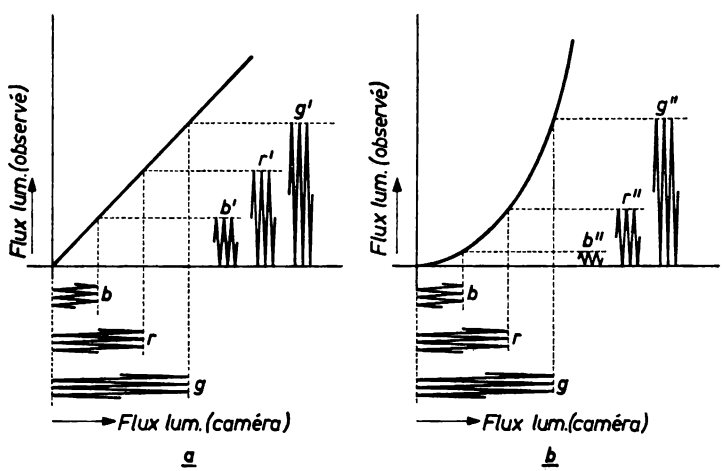


Fig. 21. Effet du manque de linéarité du canal de transmission sur l'équilibrage des couleurs.
a) avec une transmission linéaire, les composantes de couleurs r', g' et b' sont reproduites dans le même rapport de r, g et b dans la scène originale.
b) dénaturation des composantes de couleurs r'', g'' et b'', par suite du manque de linéarité du canal de transmission.

de signal résultant et, d'autre part, entre la tension de commande sur le tube-image et le flux lumineux émis par les substances luminescentes.

Les conséquences désastreuses d'une transmission non linéaire peuvent être appréciées d'après les fig. 21a et b. Dans la première, le rapport des intensités des trois composantes primaires *r*, *g* et *b* captées dans les tubes de caméra est maintenu et les trois substances luminescentes à la réception émettent de la lumière dans le même rapport (*r'*, *g'*, *b'*) ; toutes les couleurs et gradations de luminance sont ainsi respectées.

En l'absence de linéarité (fig. 21b), le rapport des couleurs primaires sur l'écran du récepteur est entièrement différent (*r''*, *g''*, *b''*) et aussi bien les couleurs que les luminances sont détériorées.

Dans le but de vérifier de façon complète la linéarité de l'ensemble du système de transmission, celui-ci peut être considéré comme comprenant trois parties, d'une part les tubes de caméra (depuis la photocathode jusqu'à la borne de sortie du signal), d'autre part les amplificateurs (préamplificateur, amplificateur correcteur et amplificateur du récepteur) et enfin les tubes-image (depuis la borne d'entrée des signaux jusqu'aux substances luminescentes). Des caractéristiques typiques de ces trois parties sont représentées aux fig. 22a, b et c. Alors qu'on ne rencontre pas trop de difficultés à obtenir la linéarité de la partie amplificatrice (*b*) pour toute amplitude requise, il n'en est pas tout-à-fait de même pour les tubes de caméra et les tubes-image (*a* et *c*). Dans les deux cas, les caractéristiques dépendent de lois élémen-

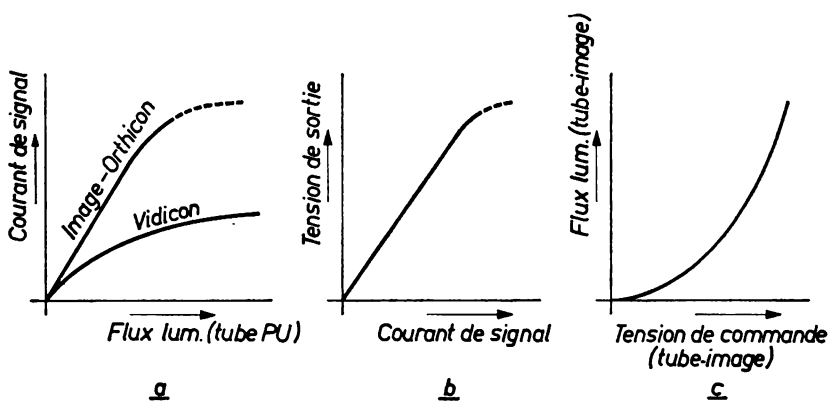


Fig. 22. Courbes de réponse typiques:
a) tubes de caméras, b) amplificateurs, c) tubes-image.

taires concernant d'une part la conversion photoélectrique (tubes de caméra) et d'autre part la distribution de la charge d'espace (tubes-image). Ces lois peuvent être explicitées par approximation par des formules simples, par exemple:

Vidicon : $i_s = C_1 \cdot \sqrt{L_i} = C_1 \cdot Li^{0,5}$

Image-orthicon: $i_s = C_2 \cdot L_i = C_2 \cdot L_i^1$

Tube-image : $L_0 = C_3 \cdot v_g^{2,2}$

dans lesquelles:

C_1, C_2, C_3 = constantes,

L_i = flux lumineux sur la photocathode,

L_0 = flux lumineux de la substance luminescente,

i_s = courant de signal du tube de caméra,

v_g = tension de commande du tube-image.

Indépendamment des constantes et des divers paramètres tels que courant, tension et flux lumineux, ces formules se ressemblent beaucoup, la seule différence résidant dans les exposants des derniers facteurs (0,5 – 1 – 2,2). Ces exposants sont par convention dénotés par la lettre grecque γ (gamma), de sorte que nous attribuons à des courbes (ou fonctions) un certain *gamma*. Celui d'une droite est de 1, celui d'une parabole est de 2 et ainsi de suite. Un gamma de 2,2, tel que celui d'un tube-image couleurs, implique une courbe intermédiaire entre une parabole ordinaire ($\gamma = 2$) et une parabole du troisième ordre ($\gamma = 3$). La caractéristique d'un vidicon avec un gamma de 0,5 est une parabole ordinaire, mais avec inversion des coordonnées (l'entrée est devenu le signal de sortie et vice versa).

Un avantage de cette convention est que si l'on doit combiner successivement diverses caractéristiques, leur multiplication (c'est notre cas) signifie simplement la multiplication de leurs gammas pour avoir le gamma de la caractéristique résultante; il n'est nullement nécessaire de connaître les valeurs absolues de chacune des caractéristiques individuelles. On voit immédiatement ainsi que dans un système comprenant, par exemple, un image-orthicon ($\gamma = 1$), un amplificateur linéaire ($\gamma = 1$ et un tube-image ($\gamma = 2,2$), on a un gamma total de $1 \times 1 \times 2,2 = 2,2$; en d'autres termes, le rendu des couleurs sera incorrect. Dans un tel cas, on doit incorporer un correcteur de gamma en un point de la partie amplificatrice, afin d'y introduire expressément une caractéristique non linéaire. Avec un gamma

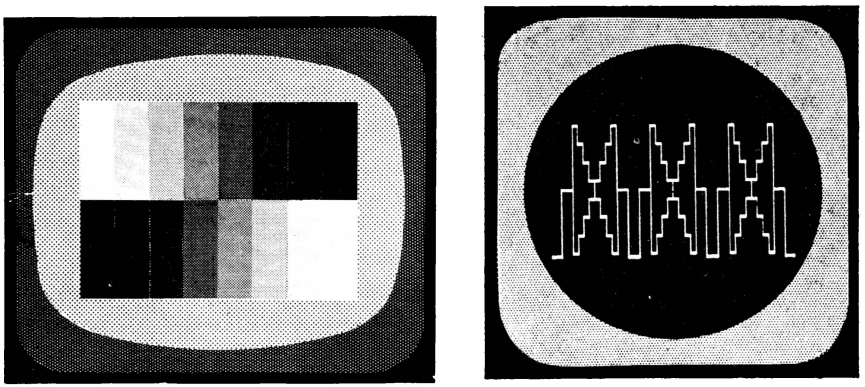
de 1/2,2 = 0,45 le gamma total serait alors de 1 × 0,45 × 2,2 = 1 et la reproduction serait correcte.

Si l'on utilisait un vidicon à la place d'un image-orthicon, le gamma total avec une amplification linéaire serait de 0,5 × 1 × 2,2 = 1,1 ne nécessitant qu'une légère correction. On notera toutefois que les valeurs indiquées ne sont que des moyennes; les tubes-image ont des gammas variant de 2,2 à 2,9 et celui d'un vidicon peut être compris entre 0,4 et 0,7. De plus, les formules simplifiées pour les diverses caractéristiques de transmission peuvent être considérées seulement comme des approximations; des séries de puissances donneraient des valeurs plus exactes, car des écarts prononcés des gammas moyens acceptés tendent à se produire, particulièrement aux plus petites amplitudes. Pour cette raison, également avec des vidicons, on utilise des correcteurs de gamma dans les trois canaux; les correcteurs étant réglables, on peut ainsi assurer une adaptation exacte entre les caractéristiques des tubes de caméra et des tubes-image*).

Il n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage de décrire le principe de ces réseaux correcteurs, mais nous devons mentionner l'utilisation qui en est également faite dans les caméras noir-et-blanc pour éviter les contrastes très accusés dans l'image résultant de la courbure prononcée de la caractéristique du tube-image. On notera aussi qu'il est nécessaire d'avoir autant que possible une plus grande stabilité des circuits utilisés en télévision en couleurs que dans le cas des images monochromes. Dans les deux systèmes de télévision, les circuits correcteurs de gamma ne sont pas placés au point théoriquement correct dans le récepteur, mais dans l'amplificateur correcteur qui fait partie de l'émetteur. Il n'y a pas d'objection à ce que cette correction soit faite à la caméra dans le cas de télévision en circuit fermé, puisque le récepteur peut toujours être réglé avec précision en observant l'image reproduite; mais pour les programmes généraux de T.V. en couleurs, ce procédé est un peu risqué, parce que la compensation sur l'émetteur n'est possible qu'avec un tube moyen; si la caractéristique d'un tube-image particulier s'écartait de la caractéristique moyenne, il en résulterait immédiatement des couleurs dénaturées.

Le contrôle de la linéarité du système de transmission et les réglages des

*) Pour être complets il nous faut dire que le nouveau tube de caméra Plumbicon a une caractéristique linéaire comme l'image-orthicon, malgré que son fonctionnement est le même que celui du Vidicon.



a *b*

Fig. 23. a) mire de gris, b) oscillogramme du courant de signal dans les trois canaux d'amplification pour un gain correctement réglé.

trois correcteurs de gamma s'effectuent à l'aide d'une mire monochrome, de préférence sous forme de ce qu'on appelle une échelle de gris, comportant une série de 8 à 12 bandes verticales de gradations allant d'un noir profond à un blanc pur (fig. 23a). Le processus consiste à régler les trois amplificateurs de caméra aux mêmes amplitudes maximales à l'aide de l'oscilloscope de contrôle (fig. 23b), puis à régler l'amplificateur du récepteur jusqu'à ce que le blanc de la mire paraisse d'un blanc pur sur l'écran ; les trois correcteurs de gamma sont alors réglés pour que les diverses densités de gris soient reproduites comme de véritables gris neutres sans aucune trace de coloration. Si l'on éclaire ensuite la mire avec une lumière jaunâtre ou bleu-vert et que les correcteurs de gamma ont été convenablement réglés, la même teinte doit être vue sur l'écran dans toutes les gradations. Sinon, d'autres corrections doivent être apportées.

Calage des couleurs

L'image en couleurs dans le récepteur est produite par mélange additif de trois images de couleurs primaires rouge, verte et bleue et il est évident qu'une image parfaite ne peut être obtenue que si ces trois images sont exactement «calées» les unes par rapport aux autres. Autrement, l'effet est le même qu'avec une mauvaise trichromie en imprimerie, les contours des sujets présentant des franges colorées.

En télévision en couleurs, un calage défectueux peut être dû à plusieurs causes très différentes. Il peut aussi bien prendre sa source dans la caméra comme dans le récepteur et l'on doit prendre soin d'éviter son apparition aux deux extrémités de la chaîne. Toutefois, les moyens préventifs peuvent s'appliquer à des domaines étendus et il n'existe pas de règle simple applicable aussi bien à la réalisation qu'au fonctionnement de l'équipement. Nous examinerons d'abord les causes d'erreurs dans la caméra, en supposant que le système optique est effectivement corrigé (cas général aujourd'hui) et que le discriminateur de couleurs ne donne lieu à aucun défaut chromatique ou de réfraction; autrement dit, un calage défectueux à la caméra ne pourrait être dû qu'à un balayage non uniforme par les trois tubes de caméra. Les défauts possibles de balayage de deux tubes de caméra sont représentés, fortement exagérés, à la fig. 24. Les diverses causes sont les suivantes:

a) Centrage; Les défauts peuvent avoir une origine purement optique; par exemple, les axes des tubes de caméra ne coïncident pas avec les axes optiques.

b) Amplitude: Les balayages lignes et trame peuvent être en cause.

c) Linéarité: Les balayages lignes et trame peuvent être en cause.

d) Rotation: Systèmes de déviation peut-être décalés l'un par rapport à l'autre.

e) Distorsion en rhombe: Les champs de déviation ne son pas perpendiculaires entre eux dans le système.

f) Distorsion en trapèze: Champs de déviation non homogènes.

g) Distorsion en tonneau (ou en coussin): Champs de déviation non homogènes.

h) Champs magnétiques extérieurs: Les défauts résultants peuvent prendre beaucoup de formes et peuvent être constants ou varier périodiquement.

i) Distorsion en S: Due à des champs débordants si le système de déviation n'est pas de haute qualité.

On doit remarquer que tous ces défauts de balayage ne sont pas l'apanage

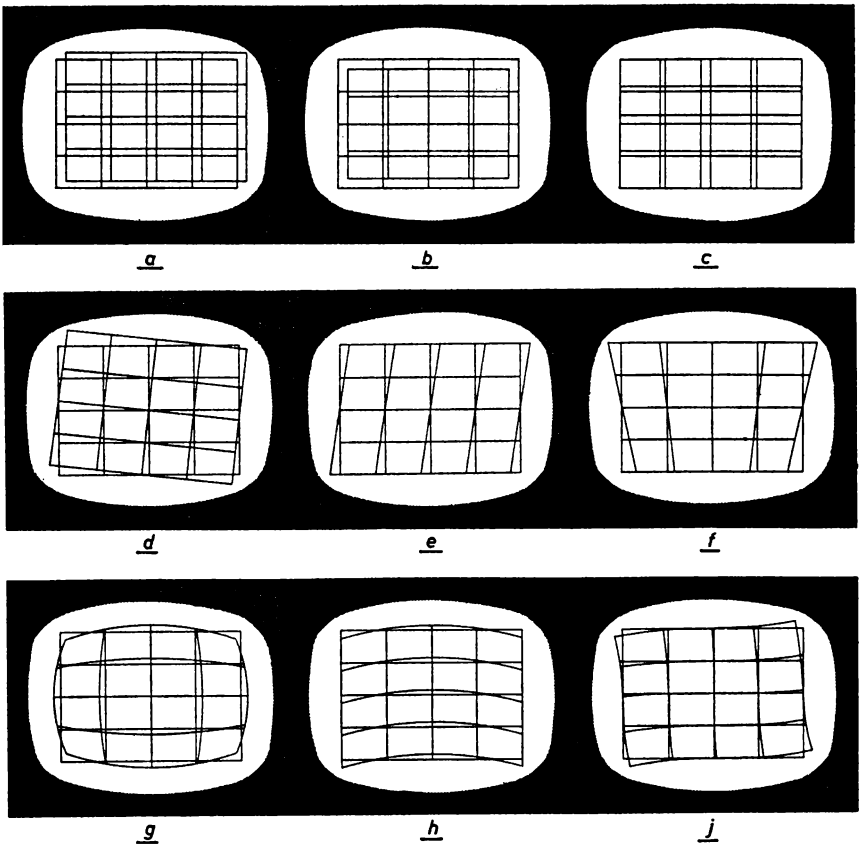


Fig. 24. Exemples divers de décalages de couleurs dans la caméra (voir texte).

des caméras couleurs; leurs chances de production sont même plus grandes pour les caméras noir-et-blanc, surtout parce qu'on y prête peut-être un peu moins attention en priorité. Une raison est qu'une superposition incorrecte des trois images due au moindre déréglage est immédiatement perceptible, alors que les mêmes défauts géométriques et de distorsion restent inaperçus en télévision monochrome, l'oeil étant moins apte à les distinguer.

Les caméras classiques T.V. sont naturellement pourvues de réglages de l'amplitude de balayage, de linéarité, de décalage et de rotation, mais les caméras couleurs doivent être munies de systèmes additionnels augmentant

la précision de ces réglages pour chacun des trois canaux. De plus, la réalisation des circuits associés doit assurer le plus possible une grande stabilité, aussi bien à court qu'à long terme, surtout par rapport aux variations de température; les trois tubes de caméra avec leurs systèmes de déviation doivent être alignés à l'aide de calibres de précision avec les axes optiques du discriminateur de couleurs et doivent aussi pouvoir tourner autour de leurs axes individuels. On doit aussi prendre plus de soin que d'ordinaire aux blindages contre les champs électriques et magnétiques extérieurs. En général, les précautions à prendre sont d'autant plus impératives que le tube de caméra est plus petit, d'où résulte que les plus grandes difficultés sont à attendre avec les petits vidicons (dimensions d'image 9,6 × 12,8 mm), plutôt qu'avec les image-orthicons (24 × 32 mm).

Finalement, indépendamment des commandes mécaniques, la plupart des réglages électriques de précision ne sont pas placés sur la caméra, mais sur le pupitre de contrôle, étant donné que c'est seulement à cet endroit qu'il est possible d'agir sur la superposition des images au moyen d'un moniteur de contrôle.

Le pupitre de contrôle

A part les réglages électriques mentionnés au paragraphe précédent, lesquels sont généralement combinés en un seul bloc avec les circuits généraux de déviation, le pupitre de contrôle comprend également les trois amplificateurs vidéo (amplificateurs de correction) et les blocs d'alimentation avec les circuits de stabilisation nécessaires, pour ne mentionner que les éléments principaux (fig. 25). Il doit aussi comporter l'oscilloscope indispensable de contrôle des formes d'onde et le récepteur couleurs ou au moins un récepteur noir-et-blanc pour contrôler immédiatement le calage des trois images, bien qu'un tel contrôle ne puisse jamais être aussi précis qu'avec un récepteur couleurs, du fait dont nous avons déjà parlé qu'un décalage dans les contours est moins facilement perçu en monochrome.

Il n'est pas nécessaire ici de discuter des circuits, mais il peut être utile de mentionner une ou deux particularités de l'amplificateur vidéo. De même que dans les appareillages de télévision noir-et-blanc, les très faibles signaux fournis par les tubes de caméra sont appliqués aux préamplificateurs dans la caméra elle-même. Ceux-ci sont réalisés avec le très important

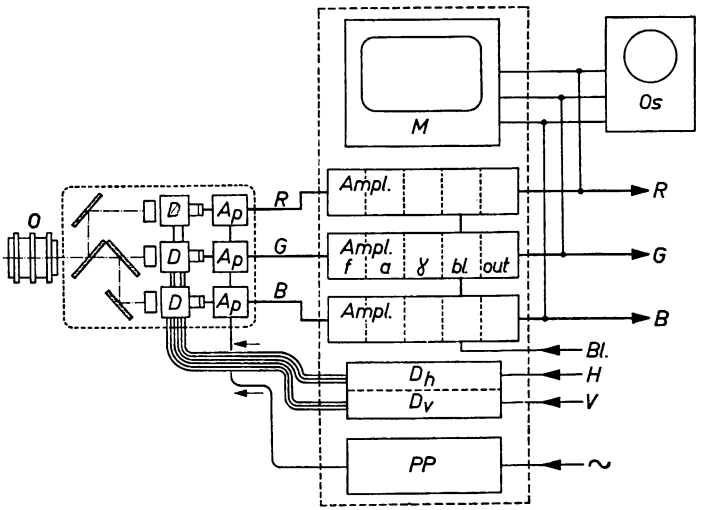


Fig. 25. Schéma synoptique d'un système de transmission de télévision en couleurs. Ap = préamplificateur; *Ampl.* = amplificateurs de correction comprenant les corrections de fréquence et de gamma et les étages de suppression et de sortie; Bl = impulsion de suppression; D = bloc de déviation; Db = base de temps de lignes; Dv = base de temps de trame; H = impulsion de synchronisation lignes; M = récepteur monochrome de contrôle; O = objectif; Os = oscilloscope à faisceau électronique; PP = alimentation; V = impulsion de synchronisation de trame; R, G, B = signaux de couleur.

souci d'obtenir une amplification exempte de bruits parasites des signaux d'entrée, lesquels sont de l'ordre de quelques dixièmes de millivolt, ou même moins. Amplifiés à quelques dixièmes de volt, les signaux sont alors suffisamment intenses pour ne pas être affectés par des parasites dus au secteur ou d'autres sources le long de leur parcours jusqu'au pupitre de contrôle, ce qui peut représenter plusieurs centaines de mètres. Généralement, les caméras couleurs ont besoin de deux ou même trois câbles, pour la simple raison qu'un câble unique, comprenant tous les conducteurs nécessaires, serait bien trop encombrant et manquerait de souplesse.

Les amplificateurs du pupitre comprennent, comme d'habitude, les moyens de corriger la courbe de réponse (pour autant que ce rôle n'a pas été effectué dans les préamplificateurs), la correction d'ouverture et enfin, mais ce n'est pas le moins important, le correcteur de gamma. Ici également, les signaux de suppression (blanking) sont mélangés avec les signaux incidents, une attention particulière étant portée à un niveau constant de blanc et de noir;

les plus petites erreurs dans le niveau de noir, spécialement, tendent à dénaturer les couleurs dans les parties sombres de l'image.

Les trois signaux de couleurs, mélangés avec les impulsions de blanking nécessaires, conviennent à la télévision en circuit fermé et peuvent être appliqués directement au récepteur ou au moniteur couleurs par trois câbles coaxiaux. Lorsqu'il s'agit d'émissions par antenne, cependant, les trois signaux sont tout d'abord combinés par un système de codage (voir page 112) pour former un seul signal-image couleurs, lequel, après adjonction de l'impulsion de synchronisation, convient à la modulation de l'émetteur (signal couleurs composite). Si l'on utilise plus d'une caméra couleurs, ou si l'image fournie par une caméra doit être combinée avec des diapositives ou un film par télécinéma, les signaux-image couleurs passent d'abord par un pupitre de mélange, comme dans la télévision noir-et-blanc.

Nous discuterons plus loin du système très compliqué utilisé pour combiner les trois signaux de couleurs pour former le signal-image couleurs, mais nous examinerons auparavant les systèmes de reproduction des couleurs utilisés à l'heure actuelle.

CHAPITRE 3

SYSTEMES DE REPRODUCTION

Le principe de base sur lequel repose la télévision en couleurs naturelles a été considéré dans les premiers paragraphes. En bref résumé, les couleurs de la scène à téléviser sont dissociées suivant un rapport fixe déterminé en leurs trois composantes primaires rouge, verte et bleue, qui sont alors converties en trois signaux vidéo *R*, *G* et *B* (fig. 11). Quelle que soit la façon dont ces signaux atteignent le récepteur, par onde porteuse ou par câble, les signaux sont utilisés pour donner trois images, une pour chaque couleur primaire, qui sont superposées pour former une image unique. Dans la fig. 11, on voit comment trois telles images sont produites par un nombre égal de petits tubes de projection dont les substances luminescentes émettent de la lumière de différentes couleurs, ces images étant projetées simultanément sur un écran translucide. Par suite du mélange additif de la lumière émergeant de l'écran, la scène transmise est vue dans ses couleurs naturelles. Il existe cependant d'autres moyens d'y parvenir et nous allons en parler.

Le système à séquence de couleurs

Dans les premières expériences en vue de réaliser ce que nous appelons maintenant la télévision en couleurs, il semble qu'on se trouvait face à deux obstacles, qui étaient insurmontables avec les moyens alors disponibles. Le premier de ceux-ci était la décomposition continue de la lumière en ses trois composantes primaires, par exemple à l'aide de miroirs dichroïques. En second lieu, on constata à l'époque qu'il était impossible de balayer les trois tubes de caméras et tubes-image électriquement à un point tel que la superposition exacte des trois images sur l'écran du récepteur reproduise la scène en couleurs naturelles. Mais ces deux difficultés peuvent être surmontées si l'on tire parti de l'inertie de l'œil humain, dans un sens un peu

plus élargi que pour l'élaboration ligne par ligne des images de télévision.

Etant donnée cette inertie, un stimulus très court donne lieu à une impression visuelle plus longue, cela étant dû aux phénomènes chimiques et électriques complexes produits dans la stimulation des bâtonnets, des cônes et des cellules nerveuses et qui impliquent certains intervalles de temps pour l'excitation et la décroissance. Cette inertie affecte non seulement notre sensation d'intensité lumineuse, mais aussi celle de la couleur d'éclats lumineux. Si l'on fait se succéder rapidement (à moins de 1/10 de seconde d'intervalle) des éclats lumineux de différentes couleurs, ceux-ci ne sont pas perçus avec leurs couleurs individuelles, mais avec une couleur unique, ce qui confirme les lois gouvernant les mélanges additifs de lumières. Cette constatation a conduit à une méthode de transmission pour la télévision en couleurs (fig. 26).

Un disque en rotation rapide comportant des filtres des couleurs primaires rouge, verte et bleue en succession (F_1) est monté entre l'objectif et le tube

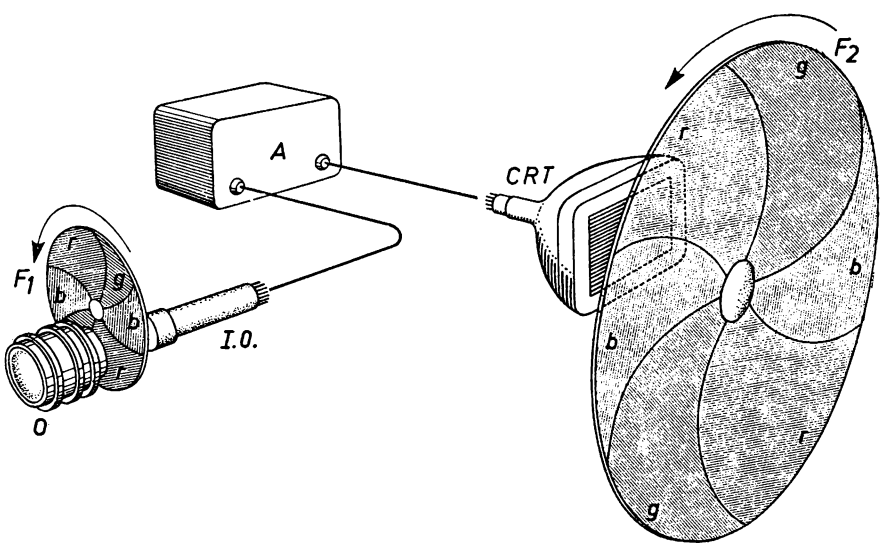


Fig. 26. Principe du système de transmission séquentiel de couleurs.
A = amplificateur vidéo; CRT = tube-image monochrome; F_1, F_2 = filtres de couleurs rotatifs (r, g, b = secteurs colorés rouge, vert et bleu); $I.O.$ = image-orthicon; O = objectif.

de caméra d'une caméra normale de T.V., de sorte que des images successivement rouges, vertes et bleues sont produites dans le tube. La vitesse de rotation du disque à secteurs colorés est réglée de telle sorte par rapport à la vitesse de balayage, que la transition d'une couleur primaire à la suivante suit d'aussi près que possible la déviation verticale du faisceau d'analyse (de bas en haut de la caméra). Dans le signal vidéo ainsi produit, chacune des trois trames contient ainsi en succession les composantes rouge, verte et bleue de la scène, le cycle suivant commençant avec la quatrième trame. Amplifié de façon classique, ce signal peut être appliqué à un tube-image unique, devant lequel tourne un disque à secteurs colorés suffisamment grand (F_2, se déplaçant du haut vers le bas). Il n'est pas difficile d'assurer une rotation synchrone et en phase des deux disques à l'aide d'impulsions de synchronisation et d'une impulsion spéciale de mise en phase et les trois trames colorées sont reproduites en succession sur le récepteur. Le téléspectateur a alors une sensation de la scène dans ses couleurs appropriées.

Inconvénients du système à séquence de couleurs

Le système que nous venons de décrire est connu comme le système C.B.S., du nom du Columbia Broadcasting System, des Etats-Unis, qui a assumé les frais énormes de développement. En 1950, ces efforts ont été couronnés de succès et le système a été adopté par la F.C.C. (Federal Communications Commission) comme norme pour la télévision en couleurs aux Etats-Unis. Une lutte à coups de millions de dollars entre ce système et un autre qui n'utilisait pas de disques et qui était patronné principalement par la R.C.A. (Radio Corporation of America) semble s'être terminée en faveur de C.B.S.

Bien que cette réalisation pouvait être considérée comme le premier pas dans le domaine de la télévision en couleurs, une première pierre très importante, cette solution du problème était loin d'être considérée comme satisfaisante. Même si, en dernier ressort, la très grande perte de sensibilité de la caméra due aux filtres, jointe à la perte de luminosité au récepteur, étaient acceptées faute de mieux, il restait encore une sérieuse disproportion entre les dimensions du récepteur et celles de l'écran, toujours du fait de l'existence des filtres. En plus, on devait compter sur les imperfections inévitables résultant de l'union entre les phénomènes électroniques et les mouvements mécaniques.

Enfin, le plus grand inconvénient était (et est encore) que si le signal couleurs doit être transmis en radiofréquence, ou bien la largeur de bande du canal doit être très grande, ou bien si la largeur de bande adoptée entre temps est gardée, dans le cas des mouvements rapides, l'écran montre un fort papillottement avec des franges colorées sur les contours des sujets. La raison en est la suivante. Comme on le sait, la bande actuelle de 7 MHz (y compris le canal son) peut avec soin être juste suffisante pour accomoder la transmission de 50 demi-images par seconde sur la base de $625/2 = 312{,}5$ lignes d'analyse. Or, si les trois images rouge, verte et bleue se succèdent l'une l'autre dans le système séquentiel, il n'y a que $50/3 = 16\ 2/3$ trames de la même couleur produites par seconde, ce qui est insuffisant pour éviter le papillottement; un effet encore plus déplaisant est constitué par les franges colorées et la dénaturation des couleurs sur les contours des sujets en déplacement. Il faut ajouter que les couleurs sont accentuées par le papillottement des lignes colorées de l'entrelacement, étant donné que 6 trames doivent s'écouler avant qu'une ligne donnée réapparaisse dans la même couleur primaire.

Ces effets très déplaisants ne pourraient être éliminés qu'en augmentant considérablement le nombre de trames par seconde, mais pour un même nombre de lignes, cela impliquerait une augmentation de la vitesse d'analyse, donc une plus grande largeur de bande. Une réduction du nombre de lignes pour un nombre accru de trames n'affecterait pas la largeur de bande, mais correspondrait à une perte de définition. Il serait sans doute possible de trouver un compromis en utilisant des nombres totalement différents de lignes et de trames, mais dans ce cas, nous nous écarterions de l'un des aspects les plus importants de tout le système, c'est-à-dire la *compatibilité*. Ce terme exprime la condition suivant laquelle le signal couleurs émis peut aussi être reproduit par n'importe quel téléviseur noir-et-blanc existant en une bonne image monochrome. De toutes façons, cette condition sera l'une des principales pour tout système de télévision en couleurs dans les années à venir.

Le système simultané

A peu près à l'époque où le système C.B.S. commençait à devenir une possibilité pratique, d'autres expériences étaient faites sur la base de prin-

cipes entièrement nouveaux et différents. Parmi ceux-ci, un système entièrement électronique sans filtres tournants atteignait le stade des essais pratiques; en particulier, la R.C.A. parut être parvenue à la solution finale avec un système à séquence de lignes et même possiblement à séquence de points. Dans le premier, la couleur primaire change à chaque ligne et non à chaque trame et dans le second, elle change avec chaque élément d'image. Cela supprima le problème du papillottement et élimina complètement les franges colorées sur les contours des sujets. La largeur de bande du canal de télévision n'avait pas besoin d'être augmentée et la compatibilité était de ce fait assurée.

Ces améliorations dans le domaine de l'analyse ont été rendues possibles d'une part par la commutation électronique des signaux vidéo et, d'autre part, par la réalisation avec succès d'un tube-image couleurs dans lequel les trois substances luminescentes étaient incorporées à l'écran en lignes alternatives extrêmement minces ou en petits points. Les trois tubes de caméra, dans lesquels les images de la scène se reproduisaient d'une façon assez primitive mais néanmoins effective dans ses couleurs primaires constituaient de ce fait un système «simultané» tandis que le récepteur était encore du type séquentiel. Ainsi, le problème du tube couleurs dans le récepteur restait encore à résoudre. C'était le facteur le plus difficile et le plus «retardateur» dans l'évolution finale d'un système, lequel est maintenant universellement adopté.

Bien que l'application des trois substances luminescentes en lignes ou en points put se faire avec grand succès et la précision voulue, le balayage nécessairement compliqué et très précis par le faisceau électronique n'alla pas au-delà du stade expérimental. La solution finale fut entraînée par la décision de réaliser un système complètement simultané, c'est-à-dire dans lequel les trois trames colorées seraient reproduites simultanément dans le récepteur. Cela était possible, si le tube avec son écran du type trichrome (qui était déjà un fait établi) pouvait être réalisé avec trois canons électroniques séparés pour diriger automatiquement les faisceaux électroniques respectifs, modulés avec le signal vidéo, sur les points rouges, verts et bleus de l'écran au cours d'une analyse normale. Un tel tube («shadow-mask tube» ou «tube à masque» de la R.C.A.) répondant à ces conditions, constitue la seule solution pratique trouvée jusqu'ici et nous le décrirons plus en détail; le problème d'un système simultané de télévision en couleurs est

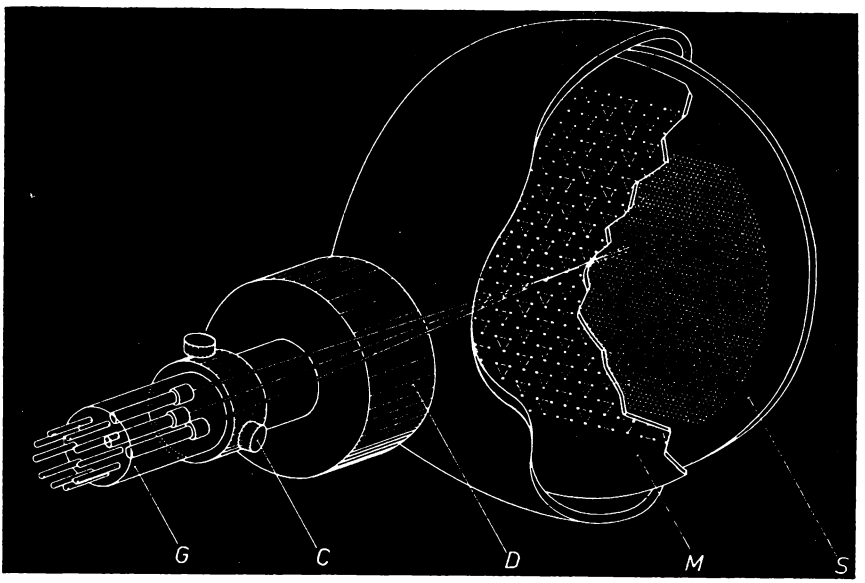
ainsi résolu de façon satisfaisante, apportant des améliorations importantes sous plusieurs rapports au précédent système séquentiel de couleurs.

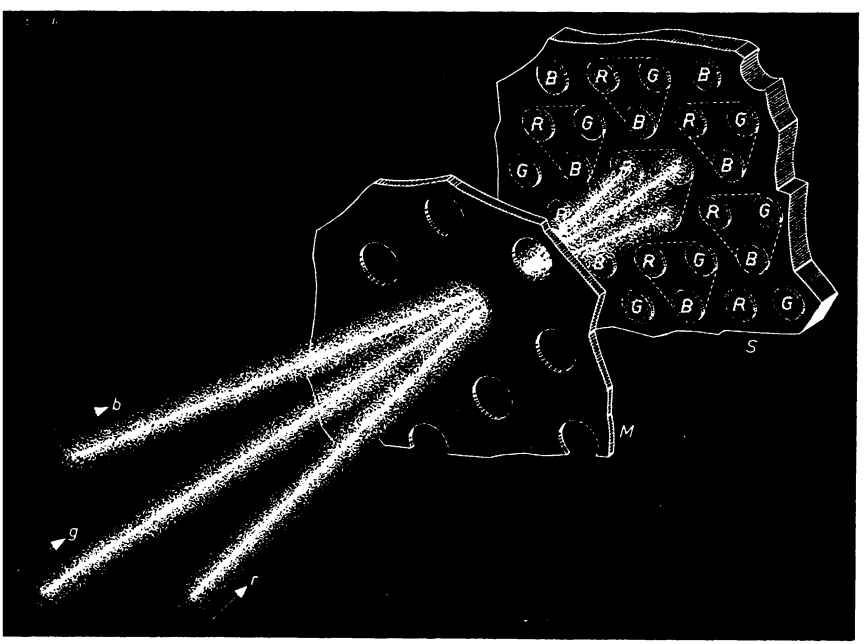
L'ingénieuse méthode de réalisation d'un système totalement simultané autour de ce tube et le développement de ce système à un stade de perfectionnement qui puisse répondre favorablement pour plusieurs années aux demandes techniques possibles présentent un tableau unique dans l'histoire de l'électronique. Pour améliorer la situation créée par le système C.B.S. qui venait juste d'être normalisé par la F.C.C., certains laboratoires de recherche des Etats-Unis joignirent leurs efforts pour fonder le National Television System Committee (N.T.S.C.), dans le but de séparer les problèmes afin d'intensifier la recherche et d'élaborer le plus rapidement possible un système de télévision en couleurs meilleur que le système C.B.S.

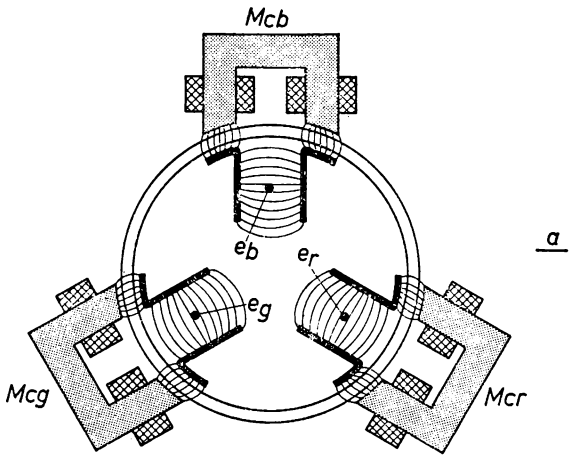
Dans un délai aussi court que douze mois, le résultat des travaux fut soumis à la F.C.C., résultat dont les idées nouvelles ne sont pas moins fascinantes rétrospectivement que les recherches théoriques complexes entreprises et l'ingéniosité de la réalisation pratique. Vu dans son ensemble, le système N.T.S.C. peut être considéré comme un triomphe de coopération et d'efforts humains. En 1951, ce système fut déclaré par la F.C.C. le système américain normalisé de télévision en couleurs. Par suite, le système C.B.S. n'est plus acceptable pour la diffusion publique mais, étant relativement simple, il aura encore des utilisations, par exemple dans les applications en circuit fermé ou avec des émetteurs à faisceau hertzien, non normalisés et à faible puissance, particulièrement pour les applications industrielles de la télévision en couleurs. Un grand avantage de ce système qui ne doit pas être sous-estimé est l'absence totale de défauts de superposition; comme nous l'avons déjà signalé, cela nécessite un maximum de précision aussi bien dans la réalisation que dans le fonctionnement de l'équipement.

Le tube à masque

Ce tube est basé sur le principe suivant. Les trois substances luminescentes qui émettent de la lumière dans les couleurs primaires rouge, verte et bleue sont appliquées sur la face avant du tube sous forme de petits points, disposés de telle sorte qu'ils constituent un réseau régulier de très petits triangles ou «triades» (*R*, *G* et *B* dans la fig. 27). Le diamètre de chaque point est d'environ 0,42 mm et la distance entre chacun d'entre eux est d'environ 0,72 mm.


G
C
D
M
S


B R G B
R G B R G
G B R B
R G
B R G B
G B R G
S
M
b
g
r



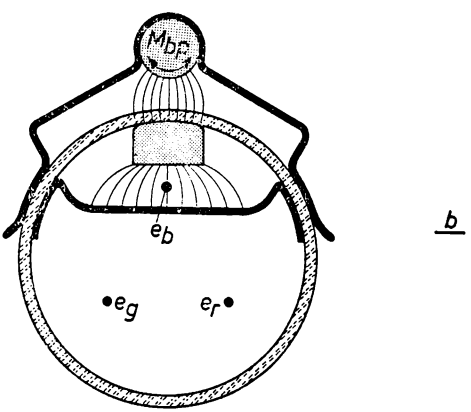


Fig. 28. a) système convergent pour le tube à masque.
b) aimant de déplacement du bleu; *eb*, *eg*, *er* = faisceaux électroniques pour les substances luminescentes bleue, verte et rouge; *Mbp* = aimant de déplacement du bleu; *Mcb*, *Mcg*, *Mcr* = aimants de convergence pour le bleu, le vert et le rouge.

Fig. 27. Le tube à masque. a) coupe; b) détails agrandis des trois faisceaux électroniques traversant le masque. g_r, g_g, g_b = canons électroniques pour les substances luminescentes rouge, verte et bleue; M = masque; S = écran luminescent constitué de triades.

A la distance normale de vision, ces dimensions sont relativement si faibles que le pouvoir de résolution de l'œil ou acuité visuelle ne parvient pas à distinguer les points individuels ou même les triades. En fait, cela signifie que, pour différentes intensités lumineuses des trois points lumineux dans les triades, l'oeil ne peut percevoir les différentes couleurs de la lumière mais (et c'est l'essence du système) seulement le mélange additif des couleurs. Ainsi, indépendamment des problèmes technologiques et pratiques posés par l'application des substances luminescentes suivant la disposition prévue, le principe fondamental de ce tube est très simple. La principale difficulté résulte du fait que les trois faisceaux électroniques, modulés respectivement par les signaux *R*, *G* et *B* et passant sur les triades dans leur balayage normal de l'écran, doivent frapper le point coloré utile dans chaque groupe. Bien qu'il ne s'agisse peut-être pas de la plus élégante des solutions, la méthode suivie pour y parvenir est d'une simplicité surprenante et tout-à-fait infaillible; il s'agit du *masque (M)*, placé à courte distance de l'écran (fig. 27a et b). On voit immédiatement d'après la figure que lorsque les trois faisceaux électroniques se croisent sur un trou du masque, ils sont obligés de frapper chaque fois le point de couleur désiré de la triade. Il y a ainsi un trou dans le masque pour chaque triade.

Convergence statique

Il ne reste plus alors que de pouvoir commander les faisceaux électroniques de telle sorte qu'en balayant l'écran ils se croisent toujours dans le plan du masque, ou que le point de *convergence* se trouve sur ce plan. Cela serait assez simple au centre de l'écran, ne nécessitant qu'un angle légèrement oblique des canons électroniques, mais en pratique on s'est aperçu qu'en dépit d'un préréglage minutieux, de petites déviations se produisent, qui doivent être corrigées à l'aide de faibles champs magnétiques.

Dans ce but, trois paires de pièces polaires sont montées dans le col du tube juste à l'avant des canons électroniques, de sorte que les faisceaux sont obligés de traverser leurs champs. Aux mêmes endroits, mais à l'extérieur du tube, trois petits électro-aimants sont disposés, leurs cuirasses étant exactement alignées sur les pièces polaires intérieures. La variation d'un courant appliqué à ces électro-aimants provoque l'apparition de faibles champs entre les pièces polaires, suffisants pour dévier radialement les faisceaux électroni-

ques (fig. 28a et b). Une déviation radiale n'est cependant pas suffisante pour assurer une convergence des trois faisceaux en un point commun au centre du masque; l'un d'entre eux au moins doit aussi être commandé dans une autre direction, de préférence tangentiellement. Dans ce but, on a choisi le faisceau «bleu» et on lui fait traverser une seconde paire de pièces polaires qui, lorsqu'elle est excitée par un aimant de déplacement latéral «bleu», déplace le faisceau horizontalement. Ainsi, avec ces quatre aimants, les trois faisceaux électroniques peuvent converger suffisamment près du centre du masque. On parle dans ce cas de *correction de convergence statique.*

Convergence dynamique

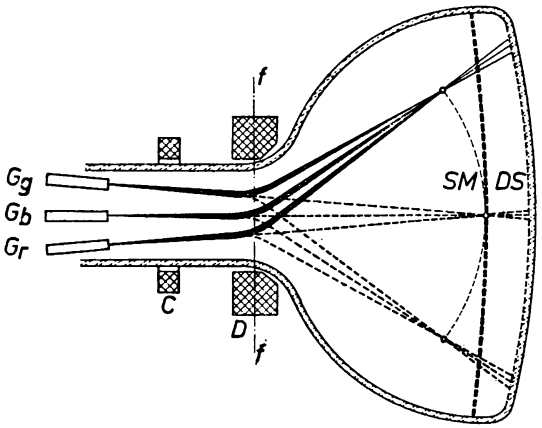
Cette question de convergence devient toutefois plus compliquée, si l'on tient compte de l'effet du balayage des trois faisceaux. Comme le montre la fig. 29a, le point de convergence tend alors à se déplacer bien au-delà du masque, de sorte que les faisceaux électroniques ne convergent plus sur un trou unique du masque, mais en recouvrent plusieurs, tout en parvenant aussi sur l'écran.

Chacun des trois faisceaux subit une déformation géométrique différente de son mouvement de balayage, ce qui donne lieu à un défaut trop prononcé de superposition des couleurs, comme le montre la fig. 29b, sous une forme un peu exagérée. Quant au rendu des couleurs, c'est-à-dire la pureté des couleurs, celui-ci n'est pas affecté, parce que les trois faisceaux frappent toujours les points luminescents de la couleur correcte, même s'ils ne se trouvent pas en fait dans la même triade.

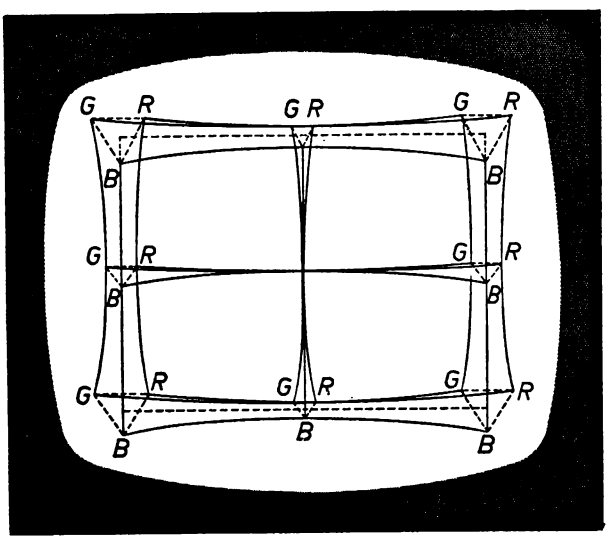
Le défaut de convergence en question doit naturellement être évité, au moyen d'une correction de convergence *dynamique.* Les pièces polaires et les aimants prévus pour la correction statique servent simultanément à la correction dynamique; cependant, alors qu'un courant continu de polarité et d'intensité requises suffit à la correction statique, nous avons besoin pour chaque canon de courants de correction variables aux fréquences de lignes et de trame. La fig. 29b montre qu'en approximation, il doit s'agir de courants de forme parabolique auxquels on donne l'asymétrie nécessaire en leur superposant un courant en dents de scie. Il s'ensuit que chaque canon nécessite ainsi 4 courants supplémentaires:

a) un courant parabolique à la fréquence de lignes,

b) un courant en dents de scie à la fréquence de lignes,



a



b

Fig. 29. Défauts de convergence dynamique.
a) la cause,
b) l'effet tel qu'il est vu sur l'écran.
C = bloc de convergence; D = bloc de déviation; DS = écran à points; Gb, Gg, Gr = canons électroniques; SM = masque; $f-f$ = plan de déviation.

c) un courant parabolique à la fréquence de trame,
d) un courant en dents de scie à la fréquence de trame.

En comprenant le courant continu de correction de convergence statique et la correction horizontale «bleue», on compte ainsi 16 commandes différentes pour avoir une convergence optimale sur toute la surface du masque.

Le réglage réel de toutes ces commandes déjà très sensibles est digne d'être mentionné, car ce grand nombre de moyens de correction n'influence chaque faisceau en dernier ressort que dans la mesure de leur ensemble complexe à l'aide de la paire de pièces polaires en cause. Cela implique que chaque faisceau doit effectuer un déplacement correctif dans une seule direction (fig. 28a), le bleu seulement verticalement et les deux autres, rouge et vert, respectivement du bas à droite et du bas à gauche à 30° de l'axe horizontal. Pour prendre le cas extrême, cela signifie que si l'on considère nécessaire d'avoir un petit déplacement vertical du faisceau rouge, par exemple, on aura un déplacement horizontal presque double (cotg 30°). En conséquence, le plus léger réajustement d'une quelconque de ces commandes entraîne généralement une répétition presque sans limites de réajustements de toutes les autres.

Nous ne discuterons pas ici des circuits de commande et de la méthode d'obtention des courants paraboliques et en dents de scie nécessaires à partir des bases de temps lignes et trame, mais nous soulignerons une condition primordiale: des courants stables et constants, ce qui est peut-être même plus important que pour les autres parties d'une chaîne de télévision en couleurs, parce que le réglage et le réajustement de la convergence est beaucoup plus difficile et prend beaucoup plus de temps, même pour un personnel entraîné, que tous les autres réglages nécessaires entre le tube de caméra et le récepteur.

Pureté des couleurs

En se réfèrant à la fig. 29, le lecteur pourrait bien se demander pourquoi, alors que les rayons incidents parviennent obliquement aux bords de l'écran, les trous du masque restent néanmoins en ligne avec les triades dont l'écran est constitué. La raison en est la suivante. Le groupage approprié des points luminescents est assuré en prenant pour base le masque lui-même avec ses perforations. Ce masque est fabriqué d'après une reproduction photo-

graphique d'un dessin à grande échelle soigneusement exécuté, cette reproduction étant réduite, puis gravée; initialement plat, le masque est alors pressé pour prendre une forme légèrement sphérique. Un appareillage de précision est alors utilisé pour le mettre exactement en place par rapport à la face plate du tube, position qu'il doit normalement occuper dans le tube terminé. Pendant ce temps, l'une des substances luminescentes, par exemple la rouge, est appliquée sur la face plate du tube sous forme d'une mince couche uniforme d'émulsion. L'appareillage dont nous venons de parler comprend une puissante source lumineuse ponctuelle montée au point précis où la déviation théorique se produira lorsque le tube sera terminé (*D'* dans la fig. 30). Ainsi, le masque remplit son rôle pour la première fois, permettant à la lumière traversant ses perforations de tomber exactement sur les points de l'émulsion qui seront frappés par le faisceau électronique «rouge». Par suite de cette irradiation, l'émulsion subit une transformation photochimique;

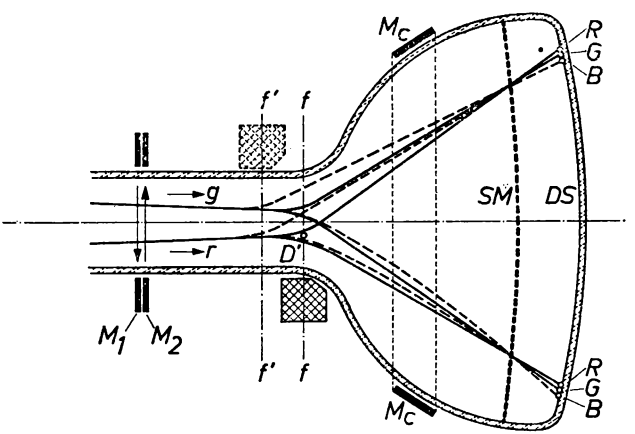


Fig. 30. Cause de détérioration des couleurs.
En haut: le système de déviation est déplacé de la position correcte $f-f$ vers un point en arrière ($f'-f'$); le faisceau électronique «rouge» r tombe sur un point vert et le faisceau «vert» sur un point bleu.
En bas: des champs magnétiques extérieurs dévient les faisceaux électroniques qui frappent alors des points incorrects.
D' = point de déviation théoriquement correct du faisceau «rouge»; M_1, M_2 = aimants de correction des couleurs; M_C = aimant de correction des champs magnétiques extérieurs; autres références comme pour la fig. 29.

par un traitement ultérieur, qui peut être comparé au développement et au fixage photographiques, l'émulsion est dissoute et éliminée aux endroits non frappés par la lumière, de sorte que seuls restent les points rouges en réseau régulier sur la face avant. Ce traitement est répété pour les points bleus et verts, la lampe étant placée chaque fois à l'endroit des points respectifs de déviation*).

C'est ainsi que les perforations du masque correspondent infailliblement aux triades luminescentes de l'écran. Ce dernier étant incurvé, il doit en être de même pour le masque; sinon, la distance entre les points et leur diamètre devraient diminuer en se rapprochant des bords de l'écran, ce qui donnerait lieu à un défaut visible d'uniformité.

Il est évident que les perforations du masque ne peuvent être convenablement alignées sur les points que si les points de déviation des trois faisceaux électroniques correspondent exactement au lieu de la source utilisée pour la fabrication de l'écran, c'est-à-dire dans le plan $f - f$ de la fig. 30.

La pureté des couleurs n'est ainsi garantie que si les trois faisceaux convergent exactement. Toutefois, cela ne s'applique pas si les lieux des points de déviation varient, par exemple à la suite d'un montage mauvais du système de déviation; les points de déviation pourraient alors se trouver dans le plan $f' - f'$ de la fig. 30 et les angles d'incidence des faisceaux sur le masque seraient différents. Supposons, à titre d'argument, que par suite d'un mauvais ajustement, le faisceau «rouge» suive la trajectoire normale du faisceau «vert»; le diagramme montre que les couleurs sur l'écran seraient pour le moins interchangées. Naturellement, un tel cas extrême ne pourrait pas se produire dans la pratique, mais cet exemple montre que les plus petites erreurs, par exemple le faisceau frappant même une fraction d'un autre point, seraient immédiatement perçues par l'œil, surtout vers les bords de l'écran. Dans ce cas, les couleurs saturées telles que le rouge, le vert et le bleu perdent de leur saturation; en d'autres termes, elles ne sont plus pures.

Un alignement incorrect du système de déviation n'est pas la seule cause possible de dénaturation des couleurs. Les champs extérieurs, même le champ magnétique terrestre, peuvent même produire cet effet avec plus

---

*) L'émulsion est appliquée par centrifugeage, la face avant tournant rapidement, de sorte que l'émulsion se répartit en couche uniformément mince sous l'effet de la force centrifuge. On notera cependant qu'il existe aussi d'autres méthodes de préparation de l'écran.

d'ampleur. Dans la moitié inférieure de la fig. 30, on suppose qu'un champ magnétique a une direction normale au plan du dessin; dans ce cas, les faisceaux électroniques suivent une trajectoire légèrement incurvée et atteignent le masque sous un angle incorrect. L'effet est le même qu'avec un réglage défectueux du système de déviation, les faisceaux tombant partiellement ou peut-être même totalement sur des points voisins, ce qui affecte la pureté des couleurs. En ce qui concerne le champ magnétique terrestre, nous devons admettre que l'effet est plus ou moins uniforme et que les trois faisceaux électroniques tombent sous son influence dès qu'ils sortent de leur cathode. Le remède consiste simplement à appliquer un champ opposé juste en avant des canons électroniques, ce qu'on obtient à l'aide de deux anneaux diamétralement aimantés placés côte-à-côte sur le col du tube (M_1, M_2, fig. 30). Le magnétisme terrestre ou tout autre champ perturbateur peut être exactement neutralisé par le champ combiné des deux aimants annulaires en les faisant tourner, soit ensemble, soit l'un par rapport à l'autre. Les mêmes aimants peuvent aussi servir à corriger les dénaturations de couleurs dues au fait que les faisceaux électroniques pourraient ne pas passer exactement à l'endroit précis du champ des bobines de déviation. On peut aussi compenser les champs perturbateurs sur la partie *avant* du tube au moyen de champs magnétiques antagonistes. On monte de six à huit aimants réglables sur la périphérie de la partie conique du tube, l'intensité et la direction du champ étant réglées (M_c, fig. 30). Les aimants de correction de pureté des couleurs sur le col du tube ayant été convenablement réglés, les aimants du cône sont alors ajustés afin d'éliminer les petites imperfections résiduelles vers les bords de l'écran.

Par suite de la sensibilité extrême du tube aux champs magnétiques extérieurs, les derniers réglages de pureté des couleurs dans le récepteur ne peuvent se faire que lorsque ce dernier est installé à son emplacement définitif. Il suffit simplement de tourner le récepteur vers une autre direction, ou même de manipuler des objets ferreux dans son voisinage, pour qu'en général de nouveaux réglages de pureté des couleurs soient nécessaires. On notera également que si des éléments ferreux dans le récepteur même, spécialement le masque du tube qui est en acier spécial, subissent accidentellement l'action d'un champ magnétique, il n'y a rien d'autre à faire que de désaimanter tout le récepteur dans un champ alternatif suffisamment puissant.

Construction générale du tube à masque

La photographie de la p. 108 représente un tube à trois faisceaux avec les éléments correcteurs dont nous avons déjà parlé, tels que le bloc de convergence, l'aimant de pureté des couleurs et l'aimant de déplacement du bleu réunis en un bloc compact fixé à l'extrémité du col du tube. Le bloc des bobines de déviation est serré contre le cône. Les aimants de correction nécessaires à la compensation des champs parasites à l'avant du tube ne sont pas représentés sur cette figure, car leur fixation ne se fait pas sur le tube, mais le plus souvent à l'intérieur du récepteur.

Jusqu'à ces derniers temps, ce type de tube n'existait qu'en type rond de 53 cm de diamètre; dans le même genre rond, il a été possible d'éviter les tensions mécaniques entre le masque et l'écran, donc de pouvoir garantir ainsi la pureté des couleurs sur une longue période de fonctionnement. Plus récemment encore, il a été possible de réaliser des tubes rectangulaires, à diamètre d'écran allant jusqu'à 63 cm, avec une bonne qualité. Jusqu'à présent, l'angle de déviation a été de 70° dans toutes les exécutions, mais on peut compter à l'avenir sur 90°. Tout comme pour la télévision en noir et blanc, on a utilisé pendant un certain temps, non pas des tubes tout-verre, mais des tubes à cône métallique. Toutefois, l'avantage inhérent à cette forme de construction, à savoir l'économie en poids, était annihilé par les inconvénients, parmi lesquels le danger d'aimantation du cône d'acier n'était pas le moindre.

De même que tous les tubes à rayons électroniques modernes, on utilise ici la déviation électrostatique, nécessitant une tension continue de 4 à 5 kV. La tension sur l'écran doit être de 20 à 25 kV, pour un courant atteignant environ 1 mA pour une luminance normale, de sorte que le générateur de T.H.T. doit pouvoir fournir de 20 à 25 W. Il peut être utile de faire se souvenir le lecteur qu'un générateur ayant de telles caractéristiques est réellement dangereux.

Comme dans les récepteurs noir-et-blanc, la T.H.T. est obtenue par survoltage et redressement des impulsions de retour de lignes, généralement avec un circuit à diode de récupération. Notons que la pratique consistant à relier la T.H.T. et le balayage de lignes dans le transformateur de sortie de la base de temps lignes a des conséquences désagréables; étant donnée la puissance relativement élevée de la T.H.T., des variations de la luminance

moyenne de l'écran donnent lieu à des variations assez considérables de la charge du transformateur, associées à des fluctuations du courant moyen d'écran. Lorsque la luminance de l'écran augmente, toutes les tensions de transformateur tombent et, indépendamment de l'élargissement de l'image (une baisse de la T.H.T. a un effet inverse plus marqué sur l'amplitude de déviation qu'une tension de déviation plus basse), des défauts de convergence (calage défectueux) se produisent immédiatement, puisque les formes des ondes paraboliques et en dents de scie ont leur origine dans le transformateur de sortie lignes. La nécessité impérative en toutes circonstances de la constance de ces courants rend réellement indispensable une stabilisation très efficace de la base de temps lignes et de la T.H.T., ce qui implique naturellement aussi une stabilisation poussée de la tension d'alimentation, surtout en ce qui concerne la déviation (y compris la verticale).

En principe, le bloc de déviation est identique à celui qui est utilisé avec les tubes-image noir-et-blanc, mais il doit être étudié et réalisé avec encore plus de soins et de précision. Les plus petites irrégularités dans le bobinage des enroulements, qui tendent à affecter l'homogénéité du champ de déviation, donnent lieu à des défauts de convergence qu'il est difficile, ou même impossible, de corriger.

Il ne reste plus maintenant qu'à dire quelques mots de la modulation des trois faisceaux électroniques par leurs signaux vidéo respectifs. Comme dans les tubes noir-et-blanc, les signaux peuvent être appliqués soit à la cathode, soit au cylindre de Wehnelt du canon (g_1), l'électrode non utilisée servant alors à régler le niveau de noir par application d'une tension continue variable. On doit se souvenir que l'écran d'un tube de T.V. couleurs ne paraît noir que si chacun des trois canons est réglé à son point de coupure (cut-off) ou au-dessous en l'absence d'un signal vidéo; d'une façon générale, les tensions continues appropriées appliquées aux trois canons ne sont pas toutes les mêmes. Si la luminosité initiale (niveau de noir) doit être augmentée ou diminuée pour une raison ou pour une autre, les intensités lumineuses des trois substances luminescentes doivent varier dans le rapport de 30 : 59 : 11 si l'on veut éviter une dénaturation des couleurs. En tenant compte des différences de rendement des trois substances et du fait que les caractéristiques des trois canons ne peuvent jamais être totalement identiques, cela signifie que les trois tensions de polarisation sur les cylindres de Wehnelt doivent être variées ensemble, dans un certain rapport, différent d'un tube

à un autre. Il en est de même pour le réglage correct des signaux vidéo eux-mêmes; comme nous l'avons déjà dit, lorsque l'image comporte du blanc, les amplitudes des signaux vidéo rouges, verts et bleus doivent être les mêmes tout au long du système de transmission. Ce n'est que sur le tube-image du récepteur que les trois signaux sont appliqués dans un rapport qui, tenant compte des rendements des substances luminescentes et des caractéristiques des trois canons électroniques, donne des intensités lumineuses sur l'écran dans le rapport de 30 : 59 : 11; ce réglage a lieu dans les amplificateurs vidéo précédant les canons électroniques dans le récepteur. Il est à peine besoin de souligner que toutes les précautions doivent être prises pour assurer une amplification constante des signaux vidéo, de même que la linéarité optimale, sinon des dénaturations sérieuses seraient observées dans les couleurs. Le lecteur se souviendra que la compensation des défauts de linéarité dans la caractéristique du tube-image a lieu à l'appareillage de prise de vues.

Le grand nombre d'incidents ou de causes possibles de désappointements dont nous venons de parler pourrait bien amener le lecteur à conclure qu'il y a peu de chances avec un tel système d'obtenir de bons résultats, ou même passables, mais les images de télévision en couleurs obtenues jusqu'ici ont montré qu'il n'en était pas ainsi. Dans des mains expérimentées, un bon récepteur donne en fait des images de la plus haute qualité, surpassant de loin en éclat et en pureté des couleurs toutes les formes de reproduction, y compris la projection de films et de diapositives en couleurs. C'est donc une raison de plus pour louer la persévérance qui a surmonté les nombreuses difficultés techniques et faisant une réalité de la télévision en couleurs. Si l'on considère que certaines conditions étaient presque impossibles à réaliser, le tube à masque en particulier peut être regardé comme un succès extraordinaire des méthodes d'applications électroniques et techniques.

Système de projection de télévision en couleurs

Ayant assez longuement parlé du tube à masque (disons en passant qu'il est actuellement le seul tube couleurs utilisé autrement qu'en laboratoire), nous ne nous étendrons pas sur les expériences précédentes ou sur les développements encore en cours. Il est certain que le tube à masque ne constitue pas la solution finale; toutefois, il n'est pas encore possible de prévoir la direction dans laquelle on trouvera cette solution.

Indépendamment du système très complexe (simultané) utilisant un tube unique, il existe (et a existé depuis les premières expériences de télévision en couleurs) des systèmes comprenant trois tubes couleurs pour projeter les images dans les trois couleurs primaires sur un écran commun, au moyen d'un système optique approprié, permettant ainsi de reproduire des scènes dans leurs couleurs naturelles. Un tel système, paraissant à première vue le plus simple de tous, a déjà été décrit par ailleurs. Cependant, en réfléchissant au problème, on se trouvait face à des difficultés qui s'opposaient à des développements ultérieurs. A côté de la luminosité relativement faible de la projection par des objectifs, le problème principal était celui de la distorsion en trapèze provoquée par l'incidence oblique des faisceaux lumineux et qui était insoluble à l'époque (vers 1940).

Depuis, la solution a été trouvée par l'utilisation de trois petits systèmes de Schmidt (miroirs concaves)*) à la place des objectifs de projection, les faisceaux lumineux du projecteur dans leurs trois couleurs primaires étant déviés vers un écran translucide par deux miroirs dichroïques et donnant finalement une image en couleurs naturelles (v. fig. 37, page 89). Ce système fonctionnait très bien et est même aujourd'hui encore utilisé, sous une forme un peu modifiée, dans quelques laboratoires. La seule difficulté digne d'être mentionnée est que les balayages dans les trois tubes de projection doivent être très soigneusement ajustés pour que les trames soient identiques, sinon le calage serait défectueux, ce qui est la pierre d'achoppement constante dans tous les systèmes simultanés.

La disposition représentée à la fig. 37, utilisant des tubes de projection de 6 cm, convient à un écran de 53 cm de diagonale; ces dernières années, la disposition de la fig. 38a (v. page 90) a été utilisée avec succès sur des écrans allant jusqu'à 4,80 × 3,60 m, avec des tubes de projection de 13 cm et des systèmes de Schmidt proportionnellement plus grands. Comme on n'utilise pas de miroirs dichroïques, on a un gain considérable d'intensité lumineuse et de netteté. Afin d'avoir un calage exact des trois trames, les deux tubes latéraux doivent naturellement toutefois être légèrement tournés vers le centre. Normalement, cela devrait provoquer une distorsion en trapèze (fig. 38b), si ce n'était le fait que pour supprimer les miroirs dichroïques on dut trouver des moyens pour compenser cette distorsion en trapèze zur l'écran

*) Voir également: *Télévision sans mathématiques*, p. 315.

en appliquant une distorsion inverse aux champs. Par superposition de dents de scie très stables aux courants normaux de déviation aux fréquences de lignes et de trame, une compensation de ce genre est obtenue à la perfection ; jointe au réglage fin de la linéarité, au décalage et à la rotation du champ, elle assure un calage extrêmement précis aussi bien pour les images que pour les couleurs.

Ce que nous avons dit au sujet du tube à masque s'applique avec peut-être plus de rigueur à ce système ; l'image finale est d'un éclat et d'une pureté des couleurs qui dépassent tout ce qu'on a pu réaliser avec le film et, dans la projection sur grand écran, représente une forme réellement impressionnante de reproduction.

Comme il a déjà été dit, cette méthode de présentation est de plus en plus largement utilisée dans l'enseignement, spécialement en chirurgie et dans d'autres branches médicales où la couleur est si importante.

Indépendamment du système de Schmidt, la télévision en couleurs peut aussi être obtenue avec le système de projection Eidophore, bien que celui-ci se serve de la méthode séquentielle comme de la méthode simultanée. Toutefois tenant compte de la méthode très compliquée de transformation de la modulation du signal vidéo en modulation du faisceau lumineux impliquant la focalisation des faisceaux électroniques, la déformation de la couche d'huile, la réfraction au point de déformation et finalement la distribution de la lumière par le miroir lamellaire, il est très difficile de conserver la linéarité entre les deux modulations. Entre autres choses, il y a une tendance à introduire une décoloration aussi bien qu'une saturation défectueuse. Cependant, l'énorme puissance lumineuse de la lampe au xénon utilisée permettra d'utiliser des écrans de l'ordre de 8 $\times$ 6 m, suffisamment grands pour des salles de 1500 spectateurs.

CHAPITRE 4

LES SYSTEMES DE TRANSMISSION

Nous avons déjà dit que l'une des conditions majeures de tout système de transmission de télévision en couleurs est sa compatibilité, c'est-à-dire la possibilité pour les récepteurs noir-et-blanc existants de reproduire sans modification les programmes couleurs comme s'il s'agissait de programmes monochromes; en d'autres termes, le signal couleurs émis doit comprendre non seulement les informations de chaque couleur, rouge, verte et bleue, mais aussi les informations habituelles des images monochromes, suivant le standard de télévision pour le système noir-et-blanc par synchronisation, suppression, direction de modulation, largeur de bande, etc. Le premier signal, contenant l'information couleurs, est le signal de *chrominance*, le second étant appelé le signal de *luminance*, en abrégé le signal Y*).

Le signal de luminance (Y)

La première question qui se présente à l'esprit est de savoir comment les signaux de couleurs primaires peuvent se transformer en signaux noir-et-blanc (monochromes). La réponse sera évidente si nous considérons pour un instant la particularité qui fait que tout ce qui nous entoure, que nous voyons toujours en couleurs, est néanmoins reconnu et accepté par nous sous la forme d'une «bonne» reproduction en noir et blanc. Notre expérience nous prouve que nous pouvons visualiser l'«information chromatique» simplement sur la base de l'«information de luminance» contenue dans la reproduction. Il s'agit là de phénomènes quotidiens; il ne faut pas beaucoup d'imagination pour visualiser un ciel bleu ou une herbe verte. En fait, notre aptitude à

---

*) Y est celle des coordonnées X, Y et Z du système de la C.I.E. qui, étant utilisée seule, donne la sensation de luminance d'une couleur (voir page 16).

«voir» des images monochromes en couleurs va plus loin, car nous pouvons non seulement distinguer une pomme verte d'un fruit mûr, mais dans une image monochrome d'un bouquet de fleurs diversement colorées, par exemple, nous pouvons aussi imaginer de façon vivante les nuances et les teintes. La raison en est que nos facultés visuelles attribuent à chaque gradation de gris, c'est-à-dire à chaque gradation de luminance dans l'image monochrome, la teinte qui a la même luminance dans la courbe de luminosité relative. Il est alors évident que pour toute reproduction monochrome d'une scène en couleurs, les diverses couleurs soient représentées dans leurs valeurs de luminance propres en fonction de la courbe de luminosité.

Tout photographe amateur sait qu'un film noir-et-blanc ordinaire ne reproduit pas fidèlement les valeurs des couleurs, surtout en présence du voile bleu du ciel. La courbe de sensibilité de l'émulsion augmente au-delà de l'extrémité bleue et violette du spectre et même dans l'ultraviolet, ce qui donne lieu à une reproduction exagérée des bleus; un ciel bleu apparaît ainsi comme blanc. Les composantes bleues de la lumière visible peuvent être affaiblies avant d'atteindre le film en plaçant un filtre jaune avant l'objectif, ce qui est une amélioration importante. Une reproduction monochrome idéale serait obtenue avec une surface sensible dont la caractéristique spectrale serait superposable à la courbe de luminosité relative, ce qu'il est possible d'obtenir avec des filtres.

Le même principe s'applique exactement à toutes les autres méthodes de reproduction, y compris à la télévision. Dans ce cas également, les couleurs naturelles, c'est-à-dire celles de la scène télévisée, doivent être rendues en valeurs de l'échelle des gris correspondant aux valeurs chromatiques de la courbe de luminosité. Ainsi, pour revenir à la télévision en couleurs, si un signal monochrome *(Y)* doit être produit à partir de trois signaux de couleurs primaires, ce ne peut être qu'en se conformant aux conditions énoncées ci-dessus.

La fig. 12a à la page 30 montre la manière dont les couleurs d'une scène sont divisées dans les trois canaux de chrominance, de même que les composantes qui les représentent dans les trois signaux de couleurs primaires. Dans ce sens, on notera que la somme des trois composantes doit en tout moment être égale à la valeur correspondant à la courbe de luminosité relative par rapport à ces couleurs. En mélangeant simplement les signaux de couleurs primaires *R*, *G* et *B*, on obtient un signal composite qui cadre

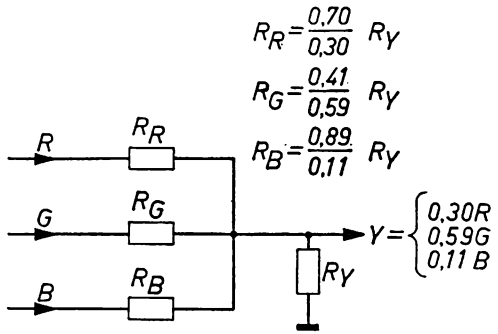


Fig. 31. Matrice à résistances dérivant le signal Y des signaux R, G et B.

exactement avec la courbe de luminosité relative; autrement dit, chaque couleur est représentée par la valeur qui correspond à la courbe.

On n'oubliera cependant pas que, pour des raisons qui ont été exposées à la page 31, les signaux de couleurs primaires des tubes de caméra passent tous immédiatement à un niveau maximal commun (pour le blanc) et que, pour retrouver une balance correcte, ces signaux doivent être réduits dans le rapport de 0,30 : 0,59 : 0,11 au récepteur. Il en est exactement de même pour le mélange des trois signaux formant le signal Y; ils sont d'abord atténués dans le rapport indiqué et la formule pour le signal de luminance peut alors s'écrire:

$$Y = 0,30\ R + 0,59\ G + 0,11\ B.$$

Cette réduction et l'addition suivante des trois signaux primaires R, G et B peuvent être effectuées en les appliquant à un réseau matriciel, dont le schéma est représenté à la fig. 31. Cependant, ce circuit, aussi simple qu'il puisse être, est rarement utilisé dans la pratique, car il présente beaucoup trop d'inconvénients. Plus généralement, on atténue tout d'abord chacun des signaux, après quoi on les combine par trois circuits à tubes électroniques à résistance de charge commune.

Répartition des fréquences

Comme nous l'avons déjà remarqué, le signal de couleurs émis doit contenir non seulement le signal Y (monochrome) dont nous venons de parler, mais

aussi un autre signal pour l'information de couleurs réelle (le signal de chrominance).

Comme les sensations de couleurs sont généralement déterminées par trois caractéristiques, la nuance, la saturation et la luminance, cette dernière étant déjà exprimée dans le signal Y, le signal de chrominance doit contenir des informations sur les deux autres, c'est-à-dire la nuance et la saturation.

Or, il est difficile de combiner deux types indépendants d'information en un signal unique (par exemple, une onde porteuse R.F.) de telle sorte qu'ils soient disponibles au récepteur à l'autre extrémité de la chaîne (démodulés) séparément et sans réaction de l'un sur l'autre. Le problème se complique encore par la nécessité d'introduire ce signal R.F. dans un canal standard de télévision déjà occupé en totalité par le signal Y, étant donné que pour respecter la compatibilité, ce signal doit correspondre à un signal monochrome normal, c'est-à-dire la porteuse vidéo qui, pour un canal de télévision donné, est modulée pour une largeur de bande de 5 MHz*). Toutefois, le problème peut être ingénieusement résolu par une répartition des fréquences.

Le spectre complet de fréquences d'un signal T.V. est reproduit à la fig. 32a (f', trait plein). Sans faire appel aux mathématiques, on peut dire que le spectre est constitué en première instance d'harmoniques de la fréquence de lignes**), soit:

$$1 \times 15\,625 = 15\,625 \text{ Hz}$$
$$2 \times 15\,625 = 31\,250 \text{ Hz}$$
$$3 \times 15\,625 = 46\,875 \text{ Hz}$$
$$\vdots \qquad \vdots$$
$$320 \times 15\,625 = 5 \text{ MHz}$$

et ainsi de suite.

A côté de ces fréquences, on trouve aussi un groupe d'harmoniques, celles de la fréquence de trame de 50 Hz, qui sont 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz, 100 Hz, etc. De la fig. 32a, on voit que la plus grande partie de la bande de fréquences en question n'est pas utilisée, ce qui suggère que l'espace disponible pourrait être occupé par un autre signal de telle sorte que les deux signaux pourraient

*) Cela concerne le standard 625 lignes. Ce dernier devant vraisemblablement être adopté comme standard couleurs européen, sera uniquement considéré dans la suite de ce livre.
**) Voir également: W. A. Holm: *Télévision sans mathématiques*, p. 220.

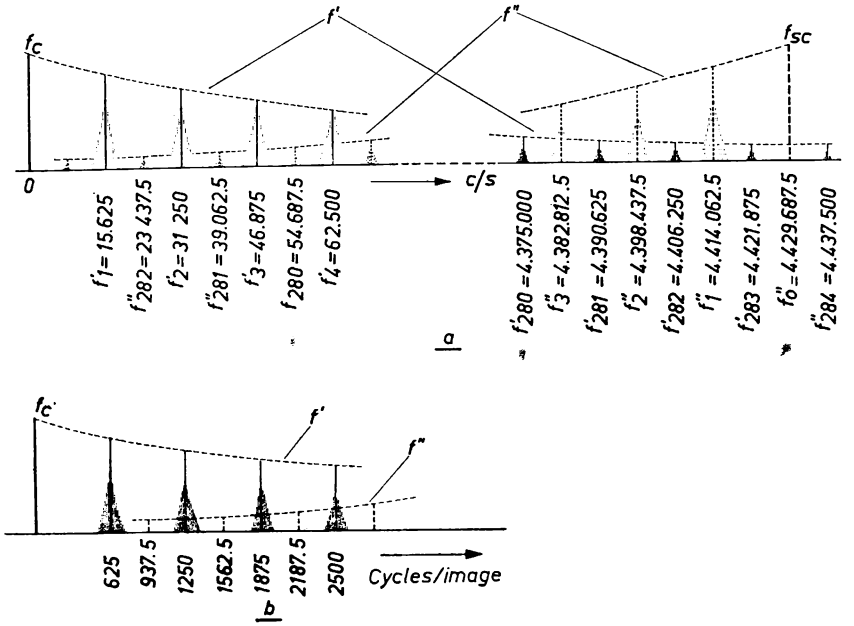


Fig. 32. Répartition des fréquences, montrant:

a) porteuse principale f_c avec ses fréquences latérales supérieures f' et sous-porteuse f_{sc} avec la fréquence latérale inférieure f''; comme la sous-porteuse est de 567 fois la moitié de la fréquence de lignes au-dessus de la porteuse principale, un saut de fréquence se produit entre les séries f' et f'' d'harmoniques; ces deux séries d'harmoniques n'interfèrent pas entre elles.

b) en divisant par 25 l'échelle des fréquences de a), on a le nombre de cycles par trame; chaque trame de la série f'' de fréquences (modulation de sous-porteuse) se termine sur un demi-cycle, de sorte que les trames successives sont en opposition de phase.

être à nouveau séparés à la réception. Par exemple, les intervalles pourraient être occupés par une autre série d'harmoniques de la fréquence de lignes (f'', ligne tiretée). Or, si l'on considère ces harmoniques comme des fréquences latérales d'une autre porteuse, la fréquence de cette dernière peut être fixée en n'importe quel point dans la bande de 5 MHz, mais en tout cas exactement à mi-chemin entre deux harmoniques de la fréquence de lignes dans la série f'. Cette nouvelle porteuse dans la porteuse de la bande de 5 MHz est dite *sous-porteuse.*

Mathématiquement, nous disons que la fréquence de cette sous-porteuse

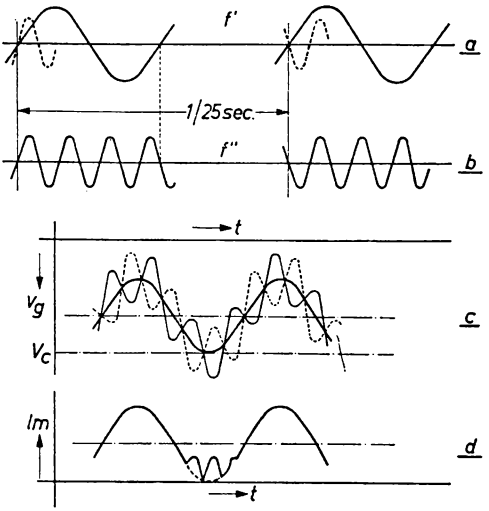


Fig. 33. Répartition des fréquences.
a) une fréquence f' sinusoïdale de modulation de la porteuse principale au hasard, en phase après chaque trame.
b) une fréquence f'' sinusoïdale de modulation de la sous-porteuse au hasard, la phase est inversée après chaque trame (ligne tiretée *a*).
c) interférence des deux fréquences de modulation appliquées à la grille de commande du tube-image couleurs; trait plein = trames paires; ligne tiretée = trames impaires; Vc = tension de seuil du tube.
d) sensation moyenne de brillance (lm) correspondant à la modulation f' de la porteuse principale; les déphasages successifs de la modulation f'' de sous-porteuse sont trop rapides pour que l'oeil les perçoive; un réseau fin ne devient visible que si l'on dépasse la tension de seuil du tube.

doit être un multiple impair de la moitié de la fréquence de lignes, ce que démontre un simple regard sur la fig. 32a. Pour des raisons que nous expliciterons ultérieurement, la fréquence de la sous-porteuse est plutôt choisie vers le haut, c'est-à-dire 567 fois la moitié de la fréquence de lignes, soit 4 429 687,5 Hz ou, en arrondissant 4,43 MHz*).

Il nous reste maintenant à expliquer la méthode de séparation des deux

*) On notera que cette fréquence de sous-porteuse a été proposée comme norme européenne, mais n'a pas encore été définitivement adoptée. Etant donnée la plus petite largeur de bande du canal, la sous-porteuse utilisée aux Etats-Unis est de 455 fois la moitié de la fréquence de lignes, soit approximativement 3,58 MHz.

signaux dans le récepteur. Indépendamment d'un étage spécial de démodulation pour la sous-porteuse, il n'est pas nécessaire d'envisager des moyens particuliers pour y parvenir, car on peut une fois de plus se baser sur l'inertie de l'oeil. Voyons comment les choses se passent à l'aide de la fig. 33.

Le lecteur sait que des signaux de toutes formes peuvent être considérés comme étant constitués d'un très grand nombre d'harmoniques de signaux sinusoïdaux purs, de sorte que, bien que la fig. 33 représente des signaux sinusoïdaux, les conclusions que nous pouvons tirer de cette figure, valides pour tout signal sinusoïdal, le sont également pour tout signal vidéo. L'oscillation sinusoïdale vue à la fig. 33a est un harmonique de la série f', c'est-à-dire du signal Y. Pour toutes les fréquences dans cette série, il doit être possible de dire qu'elles réapparaîtront dans la même phase à la fin du balayage d'une trame, c'est-à-dire en 1/25 de seconde, en admettant que le contenu de la trame ne varie pas de façon appréciable pendant cette courte durée. L'un des harmoniques de la série f'', c'est-à-dire du signal de chrominance, est représenté à la fig. 33b; on voit que tous les harmoniques dans cette série réapparaissent en opposition de phase après un balayage complet, et la raison pour laquelle il en est ainsi devient immédiatement évidente d'après la fig. 32b; si nous divisons l'échelle des fréquences de la fig. 32a par 25, nous n'aurons pas des hertz, mais des cycles par 0,04 s ou par balayage (fig. 32b). Alors que la série f' est représentée par des nombres entiers:

$$\begin{aligned} &1 \times 625 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots\ldots \\ &2 \times 625 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots\ldots \text{ cycles par balayage,} \\ &3 \times 625 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots\ldots \\ &\quad\cdot\qquad\quad\cdot \\ &\quad\cdot\qquad\quad\cdot \\ &\quad\cdot\qquad\quad\cdot \end{aligned}$$

la nouvelle série f'' se termine dans chaque cas par une demi-période:

$$\begin{aligned} &1 \times 625 + 312{,}5 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots\ldots \\ &2 \times 625 + 312{,}5 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots\ldots \text{ cycles par balayage.} \\ &3 \times 625 + 312{,}5 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots\ldots \\ &\quad\cdot\qquad\quad\cdot \\ &\quad\cdot\qquad\quad\cdot \\ &\quad\cdot\qquad\quad\cdot \end{aligned}$$

Cela signifie simplement que toutes les fréquences f'' sont déphasées d'une

demi-période après chaque balayage complet, donc qu'elles sont en opposition de phase. Dans la fig. 33a, ce déphasage des fréquences f'' est représenté par la ligne tiretée.

Lorsque la bande des fréquences des séries f' et f'' atteint finalement le récepteur et le tube-image, la tension de commande de ce tube est à tout instant égale à la somme des valeurs instantanées des tensions aux fréquences particulières qui, dans notre exemple, est la somme des fig. 33a et b. Comme les tensions aux fréquences f'' réapparaissent en opposition de phase après chaque cycle de balayage, la tension de commande pour les trames 1, 3, 5, etc. diffèrera de celle des trames 2, 4, 6, etc.; la fig. 33c montre ces deux tensions de commande alternant au rythme de 1/25 de seconde (trait plein et ligne tiretée). Sur l'écran du tube-image couleurs, le résultat d'une tension de commande alternant à 25 Hz doit nécessairement être que, interférant avec l'image construite par la fréquence f' (ou plus exactement par toutes les fréquences de la série f'), sera l'image formée par la fréquence f'' (toutes les fréquences de la série f'') variant de phase au rythme de 25 Hz, c'est-à-dire une image alternativement positive et négative à cette fréquence. Notons toutefois que l'œil ne peut suivre des changements aussi rapides, mais n'en perçoit qu'une moyenne, laquelle dans ce cas est identique à l'image requise par la série f' des fréquences (fig. 33d).

Si la caractéristique du tube couleurs (tension de commande en fonction de la luminance) était exactement inverse de la caractéristique de la sensibilité de l'œil à la lumière (la sensation de brillance en fonction de l'intensité lumineuse*), les fréquences f'' seraient alors complètement éliminées. En réalité, cependant, du fait de l'incurvation marquée de la caractéristique du tube couleurs, la compensation pour les trames en opposition de phase est incomplète, notamment si la tension de commande est quelque peu inférieure au point de coupure du tube (V_c dans la fig. 33c). Dans ce cas, une perturbation apparaît dans l'image dans ces endroits particuliers sous forme d'un réseau de lignes très fines, comme le montre le trait plein de la fig. 33d. Ce signal perturbateur sera d'autant moins remarqué que l'amplitude sera plus faible et le réseau plus fin, donc aux fréquences plus élevées. La meilleure méthode consiste à loger les fréquences f'' ayant la plus grande amplitude

*) En approximation, cette courbe est logarithmique, ce qui signifie qu'en doublant l'intensité lumineuse la sensation de brillance subit une augmentation constante.

dans la zone supérieure du canal T.V. de 5 MHz, ce qui signifie que si nous considérons les fréquences f'' comme les bandes latérales de la sous-porteuse, cette dernière doit aussi se trouver dans la même zone. Comme nous l'avons déjà dit, la fréquence de la sous-porteuse est égale à 567 fois la moitié de la fréquence de lignes, soit environ 4,43 MHz. Nous reviendrons plus loin sur l'impossibilité de placer la sous-porteuse à l'extrémité de la bande de 5 MHz.

Lorsque nous avons considéré les fréquences f' comme souhaitables et non les fréquences f'', cela n'était juste qu'en partie, du fait que les premières contiennent le signal de luminance et les secondes le signal de chrominance, mais, de même que le signal de luminance ne doit pas interférer avec le signal de chrominance, ce dernier ne doit pas interférer avec le premier dans l'image finale. Il n'est cependant pas difficile de voir que les mêmes considérations s'appliquent exactement au deuxième cas, de la même façon que nous l'avons expliqué pour le premier. Il suffit simplement de se souvenir que les fréquences f' et f'' dans les fig. 32 et 33 doivent être considérées ayant leur origine dans la démodulation de la porteuse image. Du point de vue de la démodulation de la sous-porteuse, c'est-à-dire d'un démodulateur accordé sur la sous-porteuse et n'agissant pas sur une bande très large, la situation est inversée: les fréquences f'' se succèdent en phase après chaque balayage et les fréquences f' en opposition de phase. Par suite, en pratique, les récepteurs de T.V. en couleurs sont équipés de deux démodulateurs en série, le premier, qui est accordé sur la porteuse image (ou, plus correctement, sur la F.I. image), donne lieu au signal Y ainsi qu'au signal de chrominance tel que modulé sur la sous-porteuse, tandis que le second, accordé sur la sous-

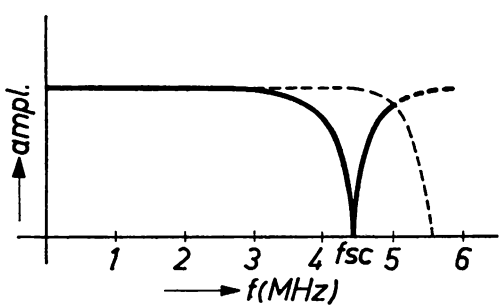


Fig. 34. Filtre réjecteur pour la suppression de la sous-porteuse par l'amplificateur Y dans le récepteur.

porteuse, fournit le signal de chrominance. On notera toutefois que pour assurer une diminution plus marquée de l'interférence du signal de chrominance sur le signal *Y*, le premier est transmis sans sa fréquence de sous-porteuse, mais seulement sous la forme de ses fréquences latérales (en général, la fréquence de la porteuse a la plus grande amplitude dans le spectre de fréquences émises.) De plus, on intercale dans l'amplificateur *Y* du récepteur un filtre à flancs raides pour la sous-porteuse et ses fréquences latérales les plus basses (fig. 34). Avec ce filtre, cependant, il est difficile d'éviter des déphasages dans la faible partie résiduelle de la bande entre 4,43 et 5 MHz.

Le signal de chrominance

Un autre problème, aussi difficile à résoudre que celui de loger le signal de chrominance avec le signal *Y* dans un seul canal de télévision, concerne le signal de chrominance lui-même. Comme nous l'avons vu, ce signal doit contenir les deux dernières caractéristiques d'une sensation de couleurs, c'est-à-dire la nuance et la saturation.

Nous avons dit précédemment qu'une seule porteuse était disponible pour cette double information, la sous-porteuse. Nous n'envisagerons pas pour l'instant la forme sous laquelle la nuance et la saturation sont exprimées comme information électrique, mais tout d'abord la méthode pour les introduire dans une porteuse unique.

Comme il s'agit de deux éléments indépendants, la porteuse doit naturellement avoir deux caractéristiques également indépendantes disponibles pour la modulation, en fait l'amplitude et la fréquence. La modulation d'amplitude n'appelle aucun commentaire, mais dans le cas de la modulation de fréquence on doit se souvenir que toute variation de fréquence due à la modulation entraîne automatiquement aussi un déphasage bien défini. Par suite, on peut considérer jusqu'à un certain point que la modulation de fréquence est similaire à une modulation de phase; cette convention est particulièrement appropriée dans le cas présent, car la modulation de la sous-porteuse devient alors une affaire beaucoup plus simple, surtout du fait qu'une modulation de fréquence effective n'est même pas pratique, puisque la répartition des fréquences ne doit pas être affectée.

En principe les deux signaux de couleur qui doivent être transmis peuvent être indépendamment l'un de l'autre modulés au porteur auxiliaire, par

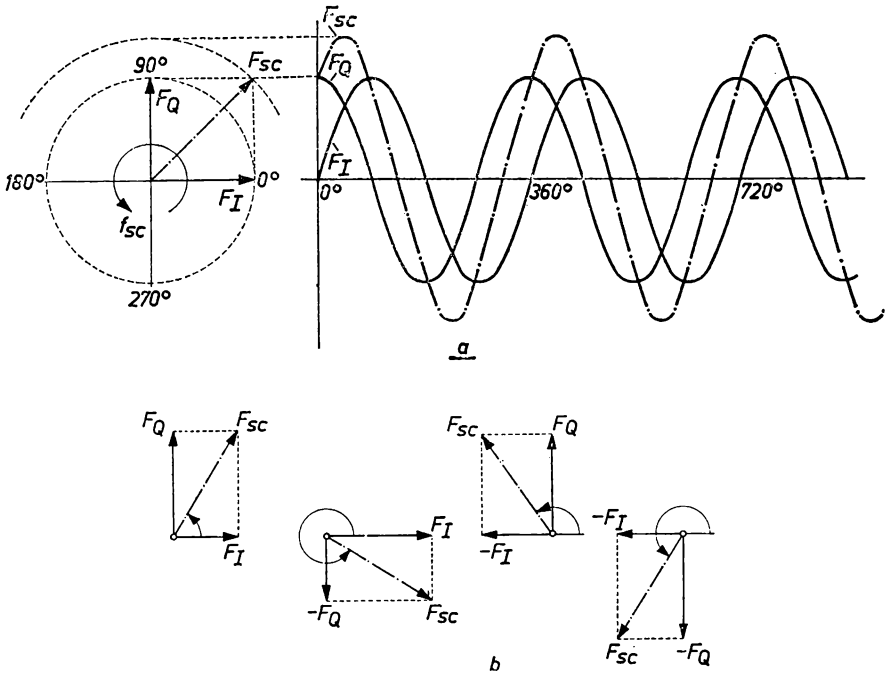


Fig. 35. Mélange additif de deux sous-porteuses de même fréquence, mais en quadrature.
a) Sous-porteuses fI et fQ de même amplitude et de fréquence f_{sc} ajoutées pour produire une sous-porteuse Fsc.
b) Quatre exemples de l'addition de deux sous-porteuses d'amplitudes et de phases différentes (+ ou —).

exemple la nuance de couleur comme modulation de phase et la saturation comme modulation d'amplitude. Il n'est pas facile de moduler de cette manière deux fois l'onde porteuse, et il est encore plus difficile de démoduler les deux modulations de l'onde porteuse dans le récepteur, de les démoduler exactement selon la phase et l'amplitude. Dans la télévision en couleurs (dans le système N.T.S.C.), on a choisi la technique suivante:

Avec un oscillateur extrêmement stable piloté par cristal, on obtient une fréquence de sous-porteuse de 4 429 687 ± 12 Hz. Une partie de la tension de sortie est appliquée à un réseau de retard avec un déphasage de 90°. On a donc *deux* sous-porteuses de même fréquence, mais de phases différentes et l'on dit que les deux ondes sont en «quadrature» l'une par rapport à

l'autre. Par convention l'une est dite «sous-porteuse *I*» (In-phase) et l'autre «sous-porteuse *Q*» (quadrature). Les deux ondes peuvent alors être modulées en amplitude, indépendamment l'une de l'autre, de manière habituelle; bien que pour l'instant nous ne savons pas encore complètement *ce qui* sera modulé, nous parlerons des deux signaux de modulation comme signal *I* et signal *Q*. Jusqu'ici, nous savons seulement que, sous une forme quelconque, les deux signaux doivent représenter la nuance et la saturation.

Les deux sous-porteuses modulées sont superposées additivement dans un étage mélangeur, à la sortie duquel on dispose uniquement d'une simple sous-porteuse. La fig. 35 montre la méthode de combinaison des deux sous-porteuses et l'on voit en a) la situation en l'absence de modulation (F_I et F_Q). La représentation bien connue d'une onde sinusoïdale au moyen de la rotation d'un vecteur a aussi été utilisée dans ce cas, parce que, pour faciliter les choses, nous utiliserons seulement ces vecteurs par la suite pour indiquer les ondes sinusoïdales*).

La fig. 35b représente quatre conditions différentes de modulation des deux sous-porteuses F_I et F_Q; en fait, leurs amplitudes varient au hasard entre des valeurs positives et négatives tout en maintenant entre elles un déphasage de 90°. La direction et la dimension de l'indicateur F_{sc} montrent immédiatement l'amplitude et la phase instantanées de la sous-porteuse complexe résultante, évitant ainsi le besoin de tracer une sinusoïde, si nous nous souvenons seulement que chacun des systèmes représentés a une vitesse de révolution égale à la fréquence de la porteuse, dans ce cas 4 429 687,5 Hz.

On voit qu'aussi bien l'amplitude et la phase de la sous-porteuse résultante dépendent sans équivoque des amplitudes des sous-porteuses F_I et F_Q; en d'autres termes, à partir d'une simple modulation d'amplitude des deux porteuses, nous obtenons une modulation d'amplitude et de phase d'*une seule* porteuse et le signal de chrominance désiré devient disponible. On peut aussi noter ici que la nuance est transmise par la phase de la sous-porteuse, laquelle peut varier de 0 à 360°, alors que l'amplitude transmet la saturation de cette nuance. Une amplitude maximale correspond donc à la saturation la plus grande possible et l'absence d'amplitude à une sensation de couleurs nulle, c'est-à-dire au blanc. Nous soulignons ce point, afin d'éviter l'erreur d'interprétation possible, par laquelle on pourrait croire que les signaux *I* et

---

*) Voir: W. A. Holm: *Télévision sans mathématiques.*

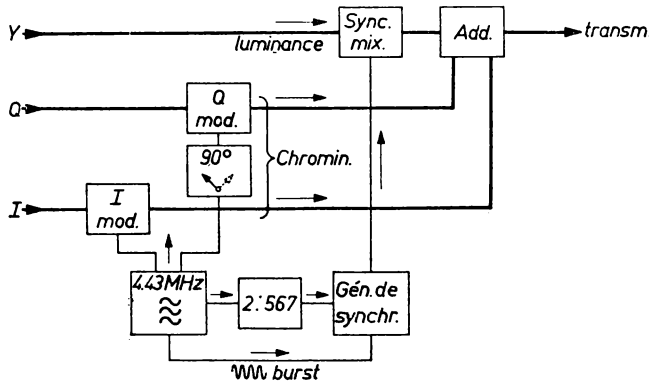


Fig. 36. Modulation des signaux I et Q et addition du signal Y pour la production du signal couleurs complet (voir texte).

Q eux-mêmes correspondraient respectivement à la nuance et à la saturation; le contenu réel de ces deux signaux sera discuté ultérieurement.

Le signal de chrominance incorporant les signaux I et Q ayant ainsi été établi, le problème principal de la transmission de trois signaux indépendants dans une bande de 5 MHz n'existe plus, au moins en ce qui concerne l'émetteur. Comme le montre la fig. 36, le signal de chrominance est ajouté au signal Y dans un étage mélangeur, le signal combiné étant alors dirigé à l'étage modulateur de l'émetteur R.F. Comme nous l'avons déjà fait remarquer, la fréquence de la sous-porteuse doit être de 567 fois la moitié de la fréquence de lignes; en pratique, on utilise toujours une fréquence de sous-porteuse pilotée par cristal divisée dans le rapport requis 567/2 par un réseau démultiplicateur. Cette fréquence est utilisée pour commander un générateur d'impulsions classique, dont la sortie est ajoutée au signal Y de façon habituelle pour servir de signaux de synchronisation et de suppression. Bien qu'une interférence du signal de chrominance avec le signal Y due à la méthode de répartition soit éliminée pour la plus grande part, il y a néanmoins une certaine interférence résiduelle, due principalement à la fréquence élevée de la sous-porteuse; on y remédie dans une large mesure en supprimant la sous-porteuse à l'émetteur. Habituellement, cela est effectué dans les deux étages modulateurs *(I* et *Q)* en utilisant pour ces étages ce qu'on appelle des circuits modulateurs compensés. Sans entrer dans les détails de ce type

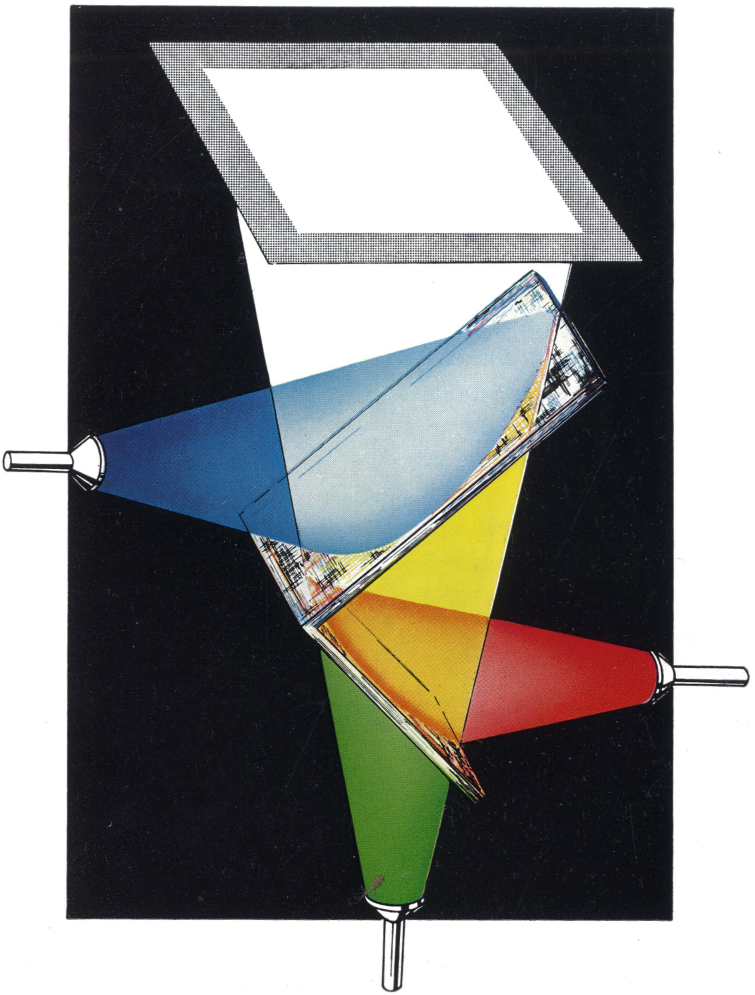


Fig. 37. Détails d'un système de projection de télévision en couleurs.

Fig. 38. Type de projecteur de Schmidt de télévision en couleurs sur grand écran.
a) principe.
b) distorsion en trapèze due aux axes convergents des trois projecteurs; la correction en est faite électriquement.

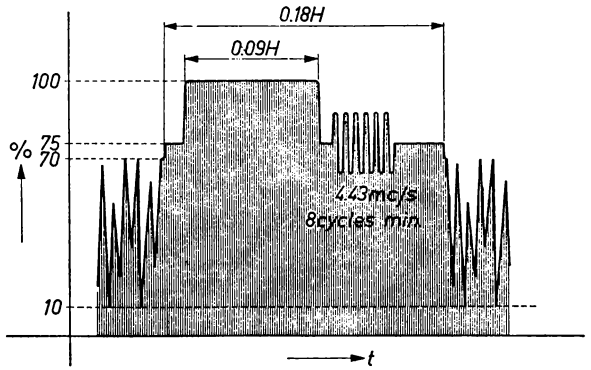


Fig. 39. Top de sous-porteuse dans le palier arrière de l'impulsion de synchronisation de lignes.

de circuits, il suffira de dire qu'ils sont constitués de deux systèmes à tubes électroniques où l'on trouve en sortie la série de la somme et de la différence des fréquences des deux signaux appliqués (fréquences de modulation et de sous-porteuse); les deux signaux eux-mêmes sont éliminés par le circuit compensé.

Ainsi, le signal de chrominance est seulement constitué en fait par les fréquences latérales inférieures et supérieures, tandis que la fréquence centrale de la porteuse manque. Cette méthode n'affecte aucunement les considérations théoriques discutées jusqu'ici, pour autant que l'on ait pris soin, dans le récepteur, que deux fréquences porteuses originaires d'un générateur local soient introduites dans le signal de chrominance, lequel, en ce qui concerne la fréquence et plus particulièrement le déphasage successif de 90°, doit correspondre aux sous-porteuses supprimées par les étages modulateurs de l'émetteur. Dans ce but, un court train d'ondes d'au moins 8 cycles (angl: Burst) est émis à la fin de chaque ligne ou, plus précisément, dans le palier arrière de l'impulsion de synchronisation de lignes (fig. 39). Ces courtes impulsions à la fréquence de la sous-porteuse se succèdant à chaque ligne, ainsi que l'adjonction d'un circuit convenable de mise en phase dans le récepteur, suffisent à bloquer l'oscillateur local (dont les oscillations doivent être aussi constantes que possible) non seulement sur la fréquence de l'oscillateur de sous-porteuse de l'émetteur, mais aussi sur sa phase. Comme nous le verrons plus loin, le plus léger déphasage dans la sous-porteuse au récepteur se manifeste immédiatement par des couleurs dénaturées.

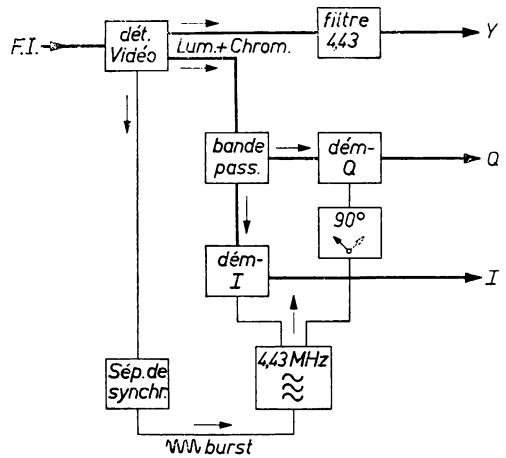


Fig. 40. Démodulation du signal couleurs complet dans le récepteur pour reconstituer les signaux *Y*, *I* et *Q* (voir texte).

Démodulation du signal de chrominance

La sous-porteuse générée dans le récepteur dont nous avons parlé au paragraphe précédent est utilisée simultanément pour séparer et démoduler les composantes *I* et *Q* du signal de chrominance; un schéma synoptique simplifié du montage est indiqué à fig. 40.

La méthode usuelle de détection dans la partie F.I. du récepteur, qui est similaire au système utilisé dans les récepteurs noir-et-blanc, conduit au mélange du signal *Y* avec le signal de chrominance (signal composite de couleurs). Ce signal mixte est ensuite appliqué directement au circuit matriciel du tube couleurs (voir page 113) et, par l'intermédiaire d'un filtre passe-bande aussi aux deux démodulateurs pour les signaux *I* et *Q*. La bande passante du filtre est environ de 2,5 à 5 MHz et élimine ainsi toute interférence sur les signaux *I* et *Q* causée par les fortes basses fréquences latérales du signal *Y* ou par la porteuse son de 5,5 MHz. Les deux démodulateurs sont du type synchrone, dont le principe est représenté à la fig. 41. Comme nous l'avons dit, les ondes porteuses d'une amplitude constante donnée peuvent être représentées par une flèche d'une certaine longueur tournant autour de son origine avec une vitesse correspondant à la fréquence porteuse (voir la fig. 37). Une porteuse modulée en amplitude peut être représentée de la même

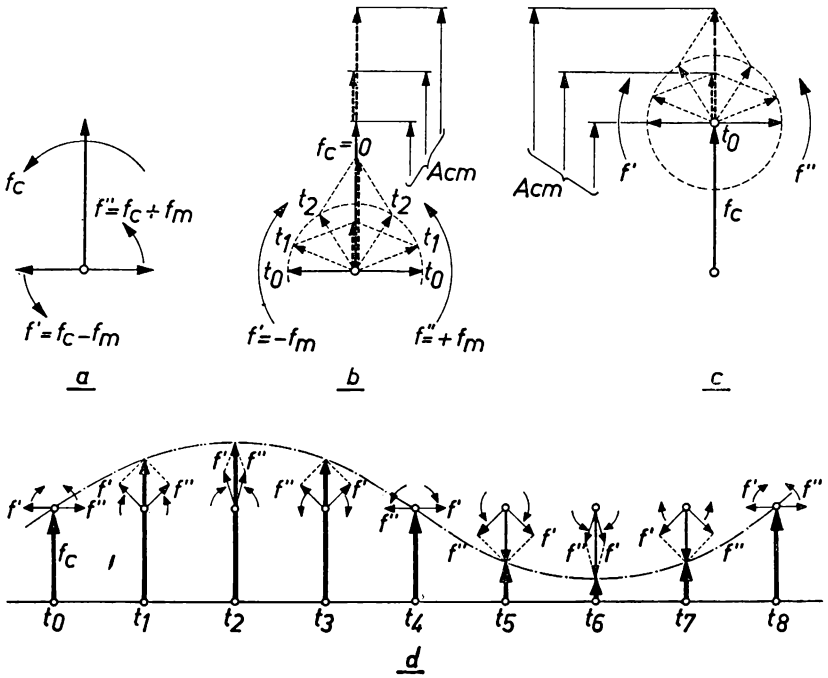


Fig. 41. Indication de la modulation d'amplitude d'une porteuse f_c avec une fréquence de modulation f_m au moyen de symboles.

a) la fréquence est représentée par une flèche tournant avec une vitesse f_c; la modulation donne lieu à une fréquence (latérale supérieure (flèche f'' à une vitesse $f_c + f_m$) et à une fréquence latérale inférieure flèche f' à une vitesse $f_c - f_m$).

b) si la flèche pour la porteuse f_c est supposée stationnaire, les flèches f' et f'' tournent à la même vitesse f_m, la première dans le sens des aiguilles d'une montre et la seconde en sens inverse; les deux flèches s'additionnent géométriquement aux instants t_0, t_1 et t_2 pour montrer l'amplitude de la porteuse non modulée, de même que la valeur instantanée A_{cm} de la porteuse modulée.

c) en plaçant les flèches f' et f'' à l'extrémité de la flèche pour la porteuse f_c, le symbole est simplifié et est plus facilement interprété.

d) modulation de la porteuse pour un cycle complet de la fréquence de modulation pour huit périodes successives; on voit clairement l'augmentation et la diminution sinusoïdales de l'amplitude.

façon si l'on se souvient que la modulation d'amplitude implique l'apparition de bandes latérales supérieure et inférieure. Si l'on appelle f_c la fréquence porteuse et f_m la fréquence de modulation, la fréquence latérale inférieure est $f' = f_c - f_m$ et la fréquence latérale supérieure $f'' = f_c + f_m$. Ces

deux ondes peuvent aussi être représentées par une flèche, auquel cas il est évident que de telles flèches, dénotant la porteuse, doivent tourner autour d'un point commun (fig. 41a). Chacune des flèches a une vitesse angulaire différente, l'onde latérale inférieure étant plus lente et la supérieure plus rapide que l'onde porteuse, du fait des fréquences différentes des trois ondes. Cependant, si la différence de vitesse entre f' et f_c et entre f_c et f'' est la même, c'est-à-dire égale à f_m, la flèche f_c peut être montrée stationnaire et les flèches f' et f'' tournant avec une vitesse f_m. Il s'ensuit que la flèche f' tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et f'' en sens inverse (fig. 41b). Les deux flèches pour les ondes latérales sont ainsi toujours symétriques par rapport à la porteuse, ce qui est une condition très importante en modulation d'amplitude. La résultante, c'est-à-dire la porteuse modulée en amplitude f_{cm}, est trouvée d'après la somme géométrique de la flèche f_c et des valeurs associées instantanées pour les flèches f' et f'', comme le montre la fig. 41b pour trois instants différents t_0, t_1 et t_2.

La construction de la porteuse modulée en amplitude f_{cm} peut être simplifiée en traçant les deux flèches, non pas à l'extrémité, mais tournant au bout de f_c de la manière indiquée à la fig. 41c. Cette convention est généralement utilisée pour décrire les conditions relatives aux ondes modulées. Pour éclaircir ce point, les diagrammes pour divers intervalles de temps sont représentés en succession à la fig. 41d, où l'on reconnaît aisément la modulation sinusoïdale de la porteuse. Dans les divers intervalles de temps, tout nombre quelconque de cycles de la porteuse choisi au hasard (nombre de tours de la flèche f_c) est possible.

Dans la fig. 42, le même système graphique est appliqué aux deux sous-porteuses modulées dont le signal de chrominance est constitué; la fig. 42a représente les deux sous-porteuses f_{cI} et f_{cQ} modulées respectivement par les signaux I et Q, avec un déphasage de 90° entre elles. La fig. 42b montre le même signal après suppression des deux fréquences porteuses, c'est-à-dire le signal de chrominance tel qu'il est réellement émis. Dans la fig. 42c, nous donnons la situation avec la démodulation-I dans le récepteur; ici, une nouvelle porteuse, en phase avec la sous-porteuse I de l'émetteur, est ajoutée au signal de chrominance pour produire une sous-porteuse normale modulée en amplitude, d'où le signal I pur est démodulé de façon usuelle.

L'injection et la démodulation suivante de la sous-porteuse peuvent être effectuées de la manière grandement simplifiée de la fig. 42d.

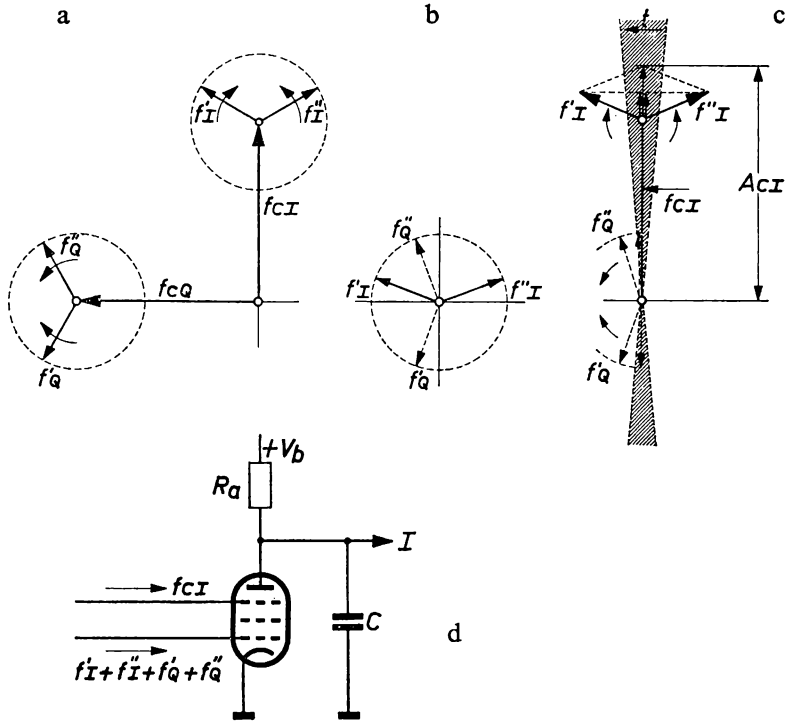


Fig. 42. Principe du démodulateur synchrone.
a) les deux sous-porteuses f_{cI} et f_{cQ} en quadrature et leurs fréquences f_I et f_Q avant la suppression de la sous-porteuse à l'émetteur.
b) avec la sous-porteuse supprimée, seules les fréquences latérales inférieures et supérieures f' et f'' des fréquences de modulation f_I et f_Q subsistent et sont émises.
c) le démodulateur I dans le récepteur ajoute la sous-porteuse f_{cI} au signal reçu en phase correcte et ne démodule que pendant le court instant t; à ce moment, les valeurs instantanées de f'_Q et f''_Q sont dans chaque cas de signe opposé et s'annulent l'une l'autre, ne laissant que le signal I démodulé d'amplitude A_{cI}.
d) schéma du démodulateur synchrone utilisant une pentode.

Le signal de chrominance, constitué par les deux bandes latérales f_I et f_Q, est appliqué à la grille de commande d'un tube à plusieurs grilles (hexode mélangeuse), la sous-porteuse I étant appliquée à la grille mélangeuse (g_3). Ce tube fonctionne de façon telle que le courant ne peut circuler que pendant les courts intervalles où la sous-porteuse est à sa valeur positive maximale (t dans la fig. 42c); le valeur du courant est déterminée par les

valeurs instantanées des quatre ondes f'_I, f''_I, f'_Q et f''_Q. Comme le montre la figure, ces valeurs instantanées des deux ondes latérales I (projections des flèches sur l'axe vertical) apparaissent toujours dans la même direction et celles des deux ondes latérales Q en sens inverse. Les deux premières s'additionnent, donnant la modulation I, tandis que les ondes Q s'annulent l'une l'autre, n'affectant pas les impulsions de courant traversant le tube. Ces impulsions, variant d'intensité avec la modulation I, donnent lieu aux bornes

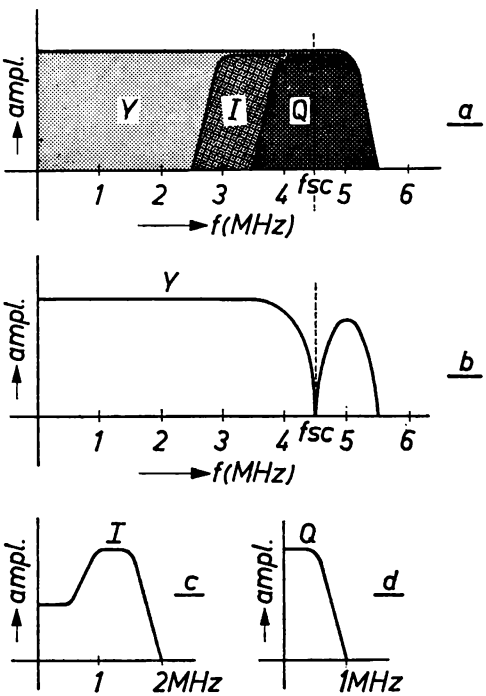


Fig. 43. Les diverses largeurs de bande pour les signaux Y, I et Q.
a) à l'émetteur;
b) pour le canal Y du récepteur; filtre réjecteur pour une suppression additionnelle de la sous-porteuse et de ses plus basses fréquences de modulation.
c) pour le canal I du récepteur; le gain double de valeur entre 0,5 et 1 MHz, parce que, étant donnée la limitation à l'émetteur dans cette gamme, la bande latérale supérieure de la sous-porteuse I disparaît (voir fig. a). Par suite, il n'y a qu'une démodulation à bande latérale unique à la moitié de l'amplitude de sortie.
d) pour le canal Q du récepteur.

de la résistance R_a à des impulsions de tension proportionnelles, filtrées de façon habituelle par un condensateur C pour donner le signal pur I.

De la même manière que le signal I est démodulé du signal de chrominance par la sous-porteuse I, le signal Q est obtenu par un deuxième démodulateur synchrone parallèle en lui appliquant la sous-porteuse Q avec son déphasage de 90°. Nous avons là la solution à la dernière difficulté dans le système de transmission; les signaux Y, I et Q sont ainsi reproduits exactement à partir du spectre complexe d'une seule onde porteuse.

Nous avons vu que le canal Y du récepteur comprend un filtre à flancs raides à 4,43 MHz pour supprimer l'interférence de la puissante amplitude de la sous-porteuse. De même, pour éviter les perturbations des signaux I et Q par les fréquences latérales inférieures du signal Y, les bandes latérales des deux premiers signaux mentionnés sont limitées à 1,5 MHz pour le signal I et à 0,5 MHz pour le signal Q; comme nous allons le voir, il n'est pas nécessaire que les largeurs de bande du signal Q soient plus grandes. L'économie réalisée sur le signal Q est au bénéfice du signal I plus important, cela étant la raison de l'inégalité des limites des deux bandes.

Une limitation similaire de la largeur de bande de ces deux signaux est effectuée à l'émetteur avant leur utilisation pour la modulation des sous-porteuses. Il n'en résulte pas de conséquences spéciales, pour autant qu'il s'agisse du signal Q, parce qu'une bande d'au moins 0,5 MHz est disponible pour les deux bandes latérales inférieure et supérieure; dans tous les cas, la fréquence de la sous-porteuse est de plus de 0,5 MHz inférieure à la limite supérieure du canal vidéo de 5 MHz. Des bandes latérales du signal I, dont la largeur de bande modulée est de 1,5 MHz, la bande supérieure, est émise fortement restreinte, considérant que la largeur de bande de l'émetteur image n'est que de 5 MHz. D'autre part, la bande latérale inférieure est transmise en totalité, avec une largeur de 1,5 MHz (fig. 43a). Il est clair par là que la démodulation du signal I restreint n'est pas effectuée en réalité tout-à-fait aussi nettement que nous venons de le décrire, car aux fréquences les plus basses, jusqu'à environ 0,5 MHz, le signal démodulé apparaît approximativement deux fois plus puissant que pour les fréquences de 0,5 à 1,5 MHz; on compense cet effet en adoptant une courbe de réponse adéquate pour l'amplificateur suivant l'étage de démodulation (fig. 43b). De plus, dans le démodulateur Q, les fréquences indésirables f'_I et f''_I, pour autant qu'elles soient comprises entre 0,5 et 1,5 MHz, ne peuvent s'annuler

l'une l'autre, étant donné que, dans cette zone, seules les fréquences f'_I existent. Dans ce cas, la démodulation du signal Q est impure, ce qui est en soi une raison suffisante pour limiter ce signal à une largeur de bande de 0,5 MHz.

Il nous reste maintenant à voir comment les signaux I et Q peuvent être élaborés pour transmettre les caractéristiques de nuance et de saturation.

Les signaux I et Q

Il a déjà été mentionné plusieurs fois que les signaux I et Q doivent transporter les informations requises concernant la nuance et la saturation des couleurs, mais rien n'a encore été dit sur la manière dont cette information peut être exprimée en signaux électriques. Examinons maintenant cette question.

Si nous nous rappelons la première nécessité d'un système de télévision en couleurs, c'est-à-dire la compatibilité, attribut par lequel un récepteur

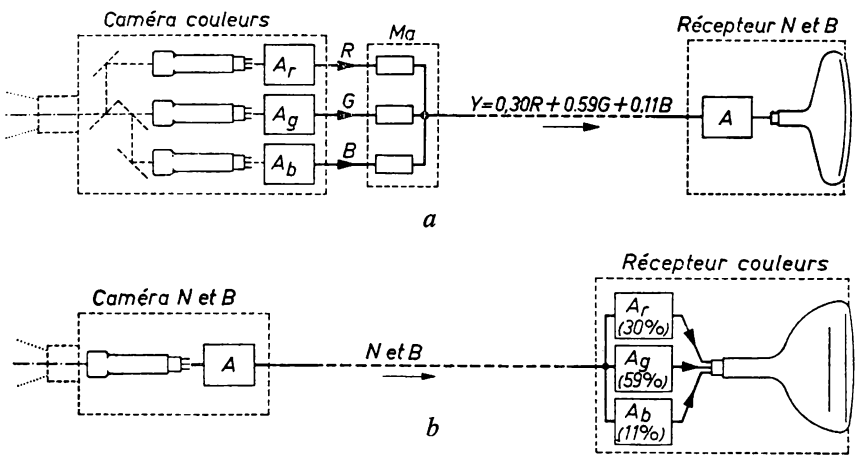


Fig. 44. Principe de la compatibilité.
a) les récepteurs noir-et-blanc doivent pouvoir recevoir en monochrome le signal d'un émetteur de télévision en couleurs; cela nécessite le signal Y.
b) la compatibilité inverse implique qu'un récepteur de télévision en couleurs puisse recevoir aussi en monochrome le signal d'un émetteur noir-et-blanc; dans ce but, le signal monochrome est divisé dans les trois canons électroniques dans le rapport de 30 : 59 : 11.
A = amplificateur monocanal. Ar, Ag, Ab = amplificateurs pour les canaux rouge, vert et bleu. Ma = matrice dérivant le signal Y.

monochrome reçoit (naturellement en noir et blanc) le signal couleurs émis, nous voyons que cette condition est satisfaite lorsqu'un signal de luminance (signal Y) est émis, constitué pour une réception monochrome optimale par une certaine proportion des trois couleurs primaires rouge, verte et bleue, soit $Y = 0{,}30\ R + 0{,}59\ G + 0{,}11\ B$. D'autre part, il existe également une *compatibilité inverse*, c'est-à-dire l'aptitude d'un récepteur de télévision en couleurs à reproduire des images noir-et-blanc sans aucune commutation spéciale. Ces deux caractéristiques sont illustrées schématiquement à la fig. 44. La partie a) s'explique d'elle-même, mais en ce qui concerne la partie b), on doit remarquer que les gains relatifs des amplificateurs du récepteur de 0,30 — 0,59 et 0,11 ne s'appliquent que si les rendements des trois substances luminescentes de l'écran sont les mêmes. Or, cela n'étant pas le cas, les gains doivent être adaptés.

Le point essentiel dans la fig. 44b est que les trois amplificateurs du récepteur couleurs sont branchés en parallèle pour la réception d'un signal mono-

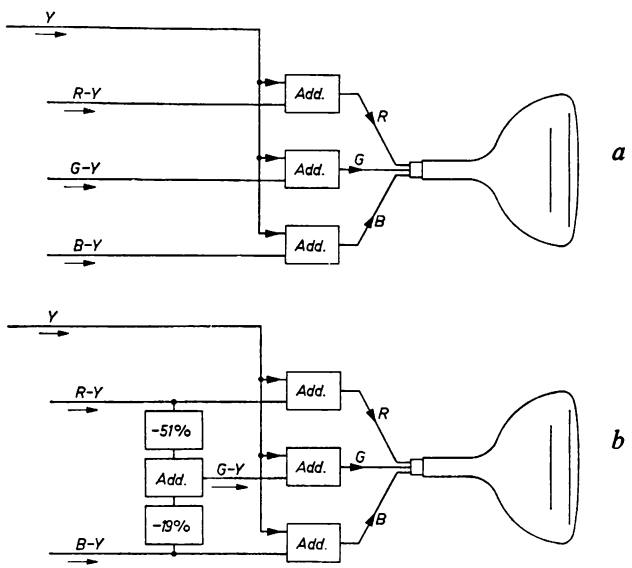


Fig. 45. a) méthode de génération des signaux R, G et B dans le récepteur par addition du signal Y aux signaux différentiels $(R - Y)$, $(G - Y)$ et $(B - Y)$.
b) le signal $(G - Y)$ est obtenu par mélange de 51% du signal $(R - Y)$ avec 19% du signal $(B - Y)$ en inversant la polarité.

chrome. Par suite, comme le récepteur doit recevoir aussi bien les émissions noir-et-blanc qu'en couleurs sans aucune commutation, la meilleure méthode dans le cas d'une émission en couleurs consiste à appliquer le signal de luminance *(Y)* aux trois amplificateurs en parallèle aussi bien. Afin de diriger les informations couleurs aux trois canaux d'amplification de même que les informations de luminance, la possibilité illustrée à la fig. 45a s'offre à nous. Dans cette figure, *(R — Y)*, *(G — Y)* et *(B — Y)* dénotent la soustraction des signaux électriques et non de valeurs chromatiques. De telles soustractions peuvent être faites électriquement très simplement si l'on se souvient que, mathématiquement, la soustraction est identique à l'addition de valeurs négatives. Ainsi, par exemple, $(R - Y) = R + (-Y)$, ce qui signifie que la polarité du signal doit d'abord être inversée par un circuit à tube électronique pour donner $-Y$. Les signaux R et $-Y$ peuvent alors être additionnés dans un circuit mélangeur classique à deux tubes avec une résistance d'anode commune pour avoir $R + (-Y) = (R - Y)$. Dans la fig. 45a, les trois signaux différentiels $(R - Y)$, $(G - Y)$ et $(B - Y)$ sont supposés avoir été produits à l'émetteur, puis transmis par une méthode quelconque et finalement démodulés et séparés dans le récepteur. Ces signaux, mélangés avec le signal Y dans sa phase originale (+), reçu sur une autre porteuse et convenablement démodulé, doivent alors conduire aux signaux originaux R, G et B, sachant que $(R - Y) + Y = R$ et ainsi de suite.

Toutefois, un désavantage de cette méthode est que quatre signaux sont nécessaires dans le récepteur Y, $(R - Y)$, $(G - Y)$ et $(B - Y)$, alors que, théoriquement, trois signaux devraient être suffisants, puisque chaque couleur est définie en totalité par trois grandeurs seulement. Mais on peut montrer que les quatre signaux ne peuvent être considérés indépendants les uns des autres; le signal Y contient déjà les détails R, G et B, car $Y = 0{,}30\ R + 0{,}59\ G + 0{,}11\ B$. Ainsi, si cette valeur est substituée dans les signaux différentiels, nous avons:

$$\begin{aligned}(R - Y) &= 0{,}70\ R - 0{,}59\ G - 0{,}11\ B\\ (G - Y) &= -0{,}30\ R + 0{,}41\ G - 0{,}11\ B\\ (B - Y) &= -0{,}30\ R - 0{,}59\ G + 0{,}89\ B.\end{aligned}$$

Pour éliminer l'un de ces trois signaux, il est mieux d'exprimer, par exemple le signal $G - Y$, en termes de l'un des autres, soit:

$$G - Y = -0{,}51\ (R - Y) - 0{,}19\ (B - Y).$$

Cette soustraction peut aussi être effectuée très simplement par des moyens électriques. Les signaux *(R — Y)* et *(B — Y)* sont tout d'abord négativés par inversion de polarité et simultanément atténués à 51% et 19% avant de les mélanger dans un circuit mélangeur ordinaire. Il est alors seulement nécessaire de transmettre trois signaux: *Y*, *(R — Y)* et *(B — Y)*; le récepteur construit alors le signal *(G — Y)* à partir de *(R — Y)* et *(B — Y)* par la méthode décrite et, par mélange avec le signal *Y*, reconstitue les signaux *R*, *G* et *B*. Ce mécanisme est illustré à fig. 45b.

Nous avons vu en détail précédemment qu'il est possible au moyen de la répartition des fréquences de la porteuse et des sous-porteuses, ainsi que de la double démodulation de ces dernières, de transmettre trois signaux indépendamment; la méthode la plus simple consiste alors à transmettre les trois signaux que nous avons appelés *Y*, *I* et *Q*. Par exemple:

$$Y = 0{,}30\ R + 0{,}59\ G + 0{,}11\ B$$
$$I = (R - Y) = 0{,}70\ R - 0{,}59\ G - 0{,}11\ B$$
$$Q = (B - Y) = -0{,}30\ R - 0{,}59\ G + 0{,}89\ B.$$

Toutefois, ces signaux ne sont pas transmis en pratique, car ils ne conduisent pas à la qualité optimale de reproduction. La raison en est la suivante. Pour commencer, nous devons rappeler au lecteur qu'il n'est pas question dans l'équation précédente d'additionner ou de mélanger des couleurs, mais des signaux électriques; le signe + indique l'addition dans la phase originale des signaux, alors que le signe — signifie une inversion de polarité avant l'addition. Essayons au moyen de l'équation de déterminer les signaux *Y*, *I* et *Q* pour une série de couleurs. Dans la fig. 48, cela a été fait pour les principales couleurs du spectre solaire, en commençant par le rouge. Le rouge, le vert et le bleu sont considérés comme primaires (approximativement 610, 535 et 470 nm respectivement), c'est-à-dire les couleurs pour lesquelles les tubes de caméras fournissent leurs signaux à leur intensité maximale (= 1,00). Le jaune, le bleu-vert (cyan) et le magenta (pourpres sont les couleurs complémentaires de ces primaires, le jaune (environ 572 nm) étant complémentaire du bleu, le bleu-vert (environ 490 nm) celui du rouge et le magenta (environ — 535 nm) celui du vert. Le magenta n'existe pas dans le spectre, mais se trouve sur la droite inférieure du diagramme de chromaticité (voir la fig. 9, page 18). La «couleur» finale choisie dans la fig. 48 est le blanc, pour laquelle, d'après les normes, les trois tubes de caméras doivent fournir des signaux égaux d'intensité maximale (= 1,00). Toutefois, nous avons déjà fait remarquer qu'il

n'est pas nécessaire aux tubes de fournir une telle intensité, si les signaux retrouvent la même amplitude dans les premiers étages d'amplification.

Si nous supposons que les couleurs indiquées sur la fig. 48 sont captées par la caméra d'après une charte des couleurs, les signaux des trois canaux d'amplification ont la forme indiquée dans le diagramme *(R, G* et *B)*. Ces trois signaux de sortie, après avoir traversé la matrice et les circuits de mélange dont nous venons de parler, conduisent à construire les signaux représentés dans les figures successives: d'abord le signal *Y*, puis les signaux $R - Y$ et $B - Y$. Les deux sous-porteuses déphasées de 90° sont ensuite modulées avec les deux derniers de ces signaux pour donner lieu à une sous-porteuse modulée en amplitude et en phase.

Dans la figure, le diagramme vectoriel est indiqué en premier (petite flèche); au-dessous, on voit les amplitudes de la sous-porteuse correspondant aux diverses couleurs.

Afin d'obtenir finalement le signal couleurs complet utilisé pour moduler l'émetteur, on doit ajouter le signal de sous-porteuse au signal *Y* comme le montre le diagramme inférieur, où les amplitudes résultantes sont indiquées. On voit qu'en partie ces dernières excèdent la valeur standard de l'unité. Si nous pensons à la compatibilité, qui implique qu'un récepteur noir-et-blanc doit donner une bonne image d'après le signal *Y* auquel il est seul à pouvoir réagir, cela signifie aussi que le signal *Y* à sa valeur maximale de 1,00 doit moduler à fond la porteuse de l'émetteur. Cependant, l'amplitude excessive du signal couleurs complet surmodulerait sérieusement l'émetteur, ce qui donnerait toutes sortes de distorsions et de perturbations dans les amplificateurs.

En même temps, on doit toutefois se souvenir que les rapports d'amplitudes indiqués à la fig. 48a se rapportent à des couleurs totalement saturées ou des couleurs spectrales presque parfaitement pures, ce qu'on n'observe que très rarement dans la pratique. Les couleurs que nous sommes accoutumés à voir autour de nous sont généralement très peu saturées, étant mélangées à un degré plus ou moins prononcé avec du blanc. Par suite, si nous avions à construire des diagrammes similaires à ceux de la fig. 48a, mais pour des couleurs non saturées, nous trouverions des amplitudes beaucoup plus faibles, ce qui ne surmodulerait pas la porteuse au même point.

Même dans ce cas, une certaine réduction des amplitudes maximales est nécessaire, ce qu'on obtient par atténuation des signaux $(R - Y)$ et $(B - Y)$ avant de moduler les sous-porteuses avec eux.

L'expérience nous ayant appris qu'une surcharge sporadique de la porteuse atteignant environ 33 % est tout-à-fait acceptable, le facteur nécessaire de réduction pour les signaux $(R - Y)$ et $(B - Y)$ a été choisi de telle sorte que, sur la base des couleurs spectrales pures dans le cas de la fig. 48a, un maximum de 1,33 fois l'amplitude du noir au blanc ne doit pas être dépassé dans le signal vidéo complet (diagramme inférieur). Les facteurs appropriés de réduction sont alors de 0,877 pour le signal $(R - Y)$ et de 0,493 pour le signal $(B - Y)$. Par suite:

$$(R - Y)' = 0{,}877\ (R - Y) = \quad 0{,}62\ R - 0{,}52\ G - 0{,}10\ B$$
$$(B - Y)' = 0{,}493\ (B - Y) = -0{,}15\ R - 0{,}29\ G + 0{,}44\ B.$$

Ces deux signaux atténués sont représentés à la fig. 48b avec le diagramme vectoriel des sous-porteuses modulées avec ces signaux, l'amplitude de la sous-porteuse résultante et aussi l'amplitude totale du signal couleurs complet composé du signal Y (non réduit) et de la sous-porteuse. Comme on peut le voir sur le dernier diagramme mentionné, les 133% admissibles de l'amplitude standard unité pour le blanc ne sont alors plus dépassés. Il n'est pas nécessaire d'épiloguer sur le fait que cette réduction dans la modulation $(R - Y)$ et $(B - Y)$ à l'émetteur doit être compensée après démodulation des deux signaux dans le récepteur, au moyen d'une amplification supplémentaire, afin de restituer l'équilibre des couleurs.

Le petit diagramme vectoriel de la fig. 48b, montrant l'addition des deux sous-porteuses avec leur déphasage de 90° pour construire la sous-porteuse composite, a été redessiné à plus grande échelle et avec plus de détails à la fig. 46. Cette figure peut être facilement expliquée en se référant à la fig. 35, qui montre la sommation de deux sous-porteuses en quadrature par quatre exemples; dans la fig. 48, une somme similaire est accomplie en un point pour six exemples, ceux des six couleurs de la fig. 48 (sans le blanc). Alors que dans la fig. 35, les deux sous-porteuses sont indiquées F_I et F_Q, elles sont ici indiquées $(R - Y)' = [F_Q^*]$ et $(B - Y)' = [F_I^*]$.

Remarquons une fois encore que ces sous-porteuses marquées d'un astérisque représentent la plus simple possibilité théorique. En fait, comme nous le verrons plus loin, un certain déphasage combiné des deux sous-porteuses se produit dans la réalité.

Les phases de couleurs

Un regard sur la fig. 46 montre que la sous-porteuse composite F_{sc} suppose

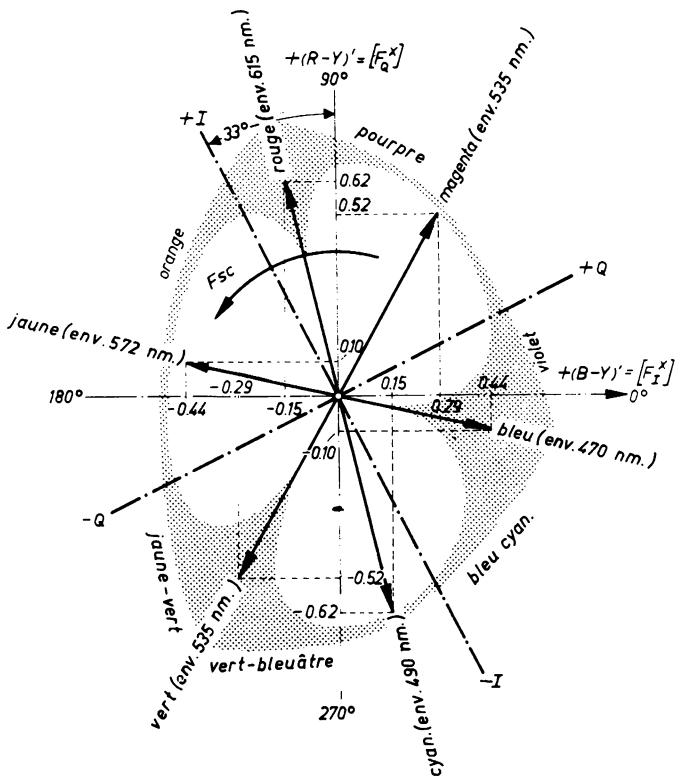


Fig. 46. Détails agrandis des signaux $(R - Y)'$ et $(B - Y)'$ de la fig. 48b, additionnés géométriquement pour fournir la sous-porteuse pour les six couleurs de la fig. 48 (trait plein). L'enveloppe triangulaire incurvée démontre le rapport entre la phase de la sous-porteuse et la couleur associée dans le diagramme de chromaticité (voir aussi la fig. 47). Les axes $I - Q$ sont tracés en traits-points épais pour indiquer les détails plus clairement qu'avec les axes $(R - Y)'$-$(B - Y)'$, car l'axe I se trouve dans la zone orangée.

une certaine phase pour chaque couleur, telle que, en débutant par le rouge et en continuant en sens inverse des aiguilles d'une montre, la totalité du spectre solaire soit produit dans sa séquence naturelle par l'orangé, le jaune et le vert jusqu'au bleu, ainsi qu'avec les pourpres qui se trouvent

au bas du diagramme de chromaticité. On voit également clairement que les paires de couleurs complémentaires (rouge et bleu-vert, vert et magenta, bleu et jaune, etc.) sont exactement en opposition de phase, tout comme elles sont opposées de part et d'autre du blanc dans le diagramme de chromaticité. Les amplitudes de la sous-porteuse composite indiquées à la fig. 46 correspondent dans chaque cas à une saturation maximale de la couleur, comme il en est également à la fig. 48. Pour des couleurs moins saturées, c'est-à-dire mélangées de blanc, les amplitudes sont plus faibles, la sous-porteuse disparaissant pour le blanc pur (voir aussi la fig. 48). Comme il a été dit au paragraphe précédent, la phase de la sous-porteuse composite représente ainsi la nuance et l'amplitude la saturation.

Si, dans le diagramme de la fig. 46, chaque direction (phase) correspond à une certaine nuance, les directions des deux sous-porteuses (supposées) F_I* et F_Q* doivent aussi avoir des couleurs propres; celles-ci peuvent être calculées à l'aide des équations pour $(R - Y)'$ et $(B - Y)'$ et le système de coordonnées sur lequel est basé le diagramme de chromaticité. Le résultat est indiqué à la fig. 47. Les directions originales des sous-porteuses qui

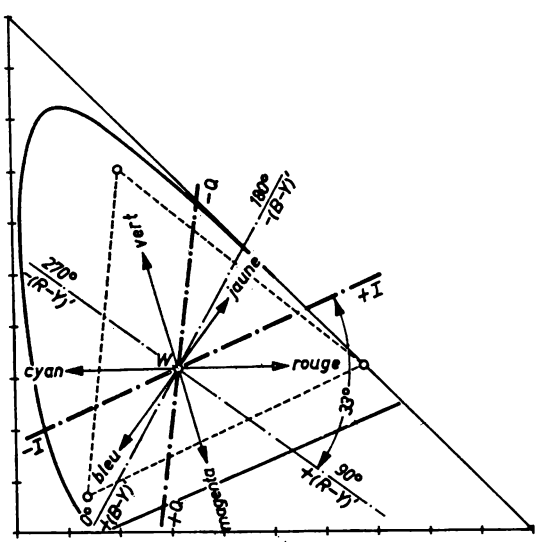


Fig. 47. Orientation des axes $(R - Y)'$ et $(B - Y)'$ et sous-porteuses I et Q définitives dans le diagramme de chromaticité.

étaient perpendiculaires entre elles réapparaissent maintenant comme coordonnées basculées avec l'origine dans le point blanc. Afin de clarifier le rapport entre ces coordonnées et celles de la fig. 46, les directions en fonction des primaires et de leurs couleurs complémentaires sont indiquées à nouveau.

L'orientation des coordonnées dans le diagramme a l'importante signification suivante. Si les deux signaux $(R - Y)'$ et $(B - Y)'$ étaient appliqués sur les deux sous-porteuses, l'une d'elles contiendrait les nuances portées sur l'axe $+ (R - Y)' \ldots\ldots - (R - Y)'$, mais il n'y en aurait en fait que deux, des complémentaires: un pourpre (environ — 496 nm) et un bleu-vert (environ 496 nm) avec divers degrés de saturation, de la saturation maximale au blanc. L'autre sous-porteuse $(B - Y)'$ ne contiendrait que la paire de couleurs complémentaires jaune-vert (environ — 570 nm) et violette (environ 570 nm), également dans une gamme de saturation se terminant au blanc. Comme il a été dit, les deux sous-porteuses modulées devant être transmises dans des largeurs de bande différentes (voir page 96), on doit déterminer lequel des deux signaux doit être transmis avec le plus d'avantage dans la plus petite bande, autrement dit pour laquelle des couleurs mentionnées une perte de détails sera le moins perceptible.

Une étude approfondie de cette question a mis en lumière quelques faits d'un grand intérêt. On a trouvé, par exemple, que la perception et la discrimination des couleurs par l'œil humain n'étaient pas parfaites au point de pouvoir identifier sans équivoque des couleurs de détails très fins; en d'autres termes, alors que les considérations affectant la synthèse de l'infinie variété des sensations de couleur d'après les trois primaires s'appliquent entièrement à tous les objets colorés de surface relativement grande, les lois relatives peuvent être simplifiées en augmentant la finesse du détail coloré observé. Par exemple, dans le cas d'un détail de finesse telle que d'après les conventions admises en télévision il correspondrait à 0,5 MHz et au-delà, notre aptitude à la discrimination des couleurs est si réduite que les nuances individuelles parmi la multiplicité des couleurs ne sont perçues que comme des couleurs orangées ou bleu-vertes plus ou moins saturées ou même comme des gris plus ou moins denses.

Pour des détails encore plus fins, correspondant par exemple à des fréquences de 1,5 MHz et au-delà dans le signal vidéo, l'œil est même incapable de distinguer l'orangé du bleu-vert et ne voit qu'un gris, seule une certaine luminance étant perçue.

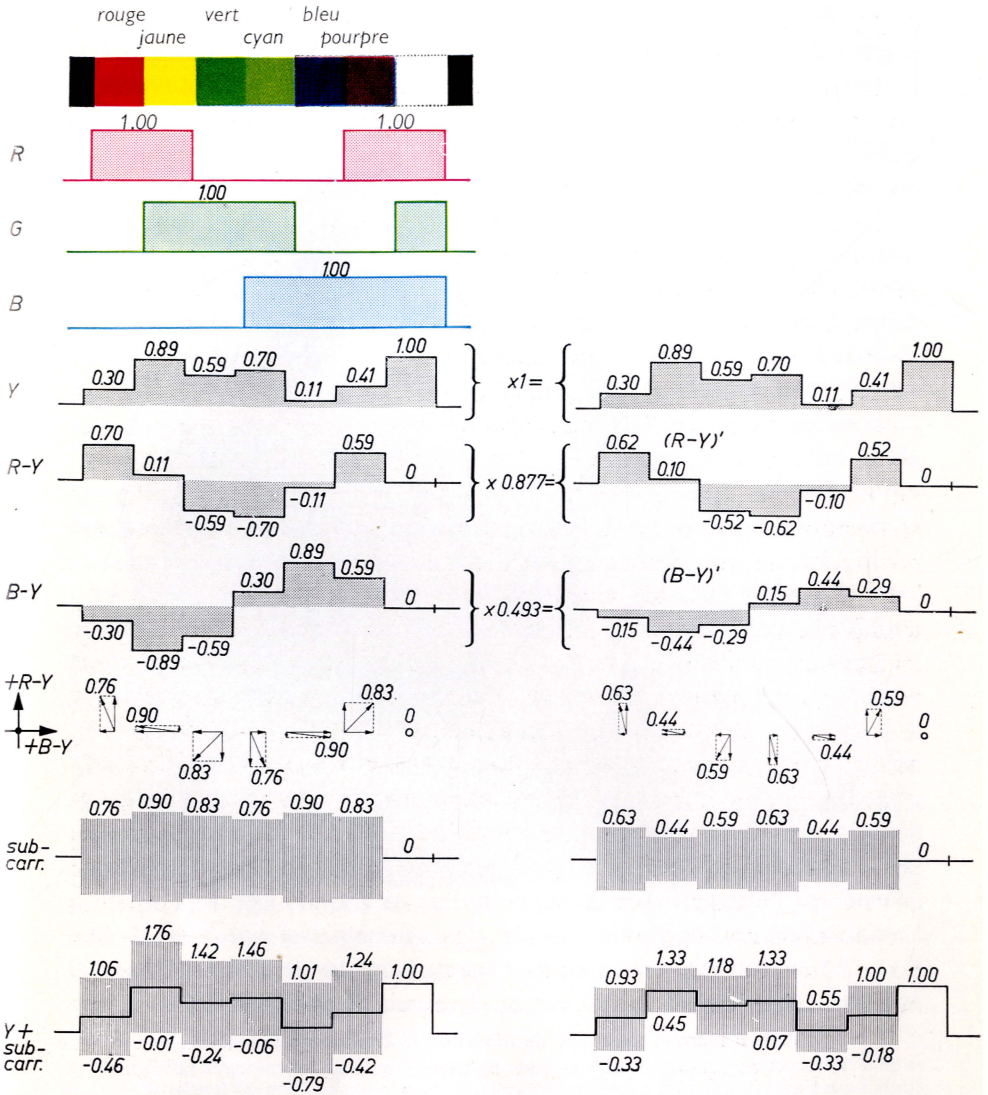
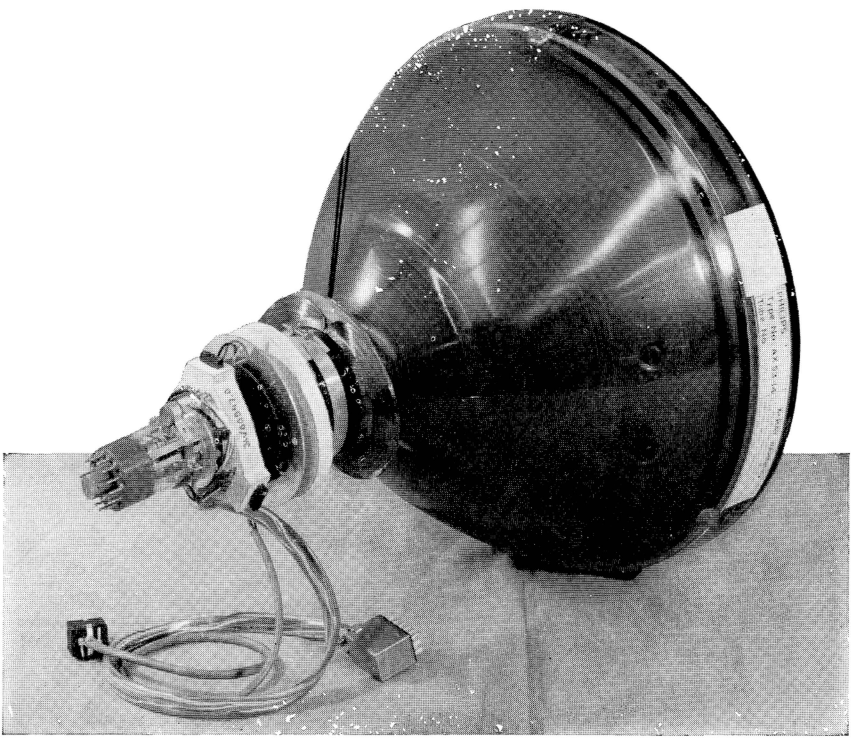


Fig. 48. Amplitudes des signaux des tubes de caméras à la porteuse vidéo modulée à l'émetteur pour six couleurs différentes (voir texte).
a) sans réduction des signaux (R — Y) et (B — Y).
b) avec ces signaux atténués pour limiter la surmodulation de l'émetteur à 133 %.



Tube à masque avec bloc de déviation et bloc de convergence.

En appliquant ce phénomène à la télévision en couleurs, nous trouvons que:

a) Les grandes surfaces, ainsi que les détails les plus importants (fréquences inférieures à 0,5 MHz), doivent être reproduits dans leurs couleurs vraies, c'est-à-dire que les trois primaires doivent être transmises.

b) Les détails plus fins (fréquences de 0,5 à 1,5 MHz) n'ont besoin d'être reproduits que dans une de deux teintes, soit orangé, ou un bleu-vert d'une certaine saturation ou même comme un gris.

c) Les détails les plus fins (fréquences supérieures à 1,5 MHz) n'ont aucunement besoin d'être en couleurs; la transmission du signal Y est suffisante*).

On a déjà tenu compte de la condition a) ci-dessus en fixant la fréquence de sous-porteuse à plus de 0,5 MHz de la limite supérieure de la bande de fréquences disponible pour l'émission de télévision. Comme nous l'avons déjà vu, les sous-porteuses peuvent de la sorte être modulées par les deux signaux pour l'information de couleurs (signaux I et Q) jusqu'à 0,5 MHz avec des bandes latérales symétriques, permettant ainsi une séparation précise jusqu'à cette fréquence dans le récepteur. On est alors assuré d'avoir une transmission exacte de l'information couleurs complète jusqu'à 0,5 MHz.

Le point b) nous apprend qu'une seule sous-porteuse modulée suffit pour les détails plus fins (fréquences comprises entre 0,5 et 1,5 MHz). Du fait que les couleurs pour de tels détails sont une paire de couleurs complémentaires, c'est-à-dire orangé et bleu-vert, il doit y avoir un déphasage de 180° entre les sous-porteuses modulées pour ces deux teintes (voir l'axe I de la fig. 46). Toutefois, ce déphasage de 180° signifie simplement un saut de la phase d'une des sous-porteuses; une deuxième onde serait non seulement inutile, mais donnerait lieu à une interférence. Le fait qu'une seule sous-porteuse soit nécessaire pour les fréquences comprises entre 0,5 et 1,5 MHz (la sous-porteuse I) a déjà été pris en considération dans la limitation des bandes latérales de l'autre sous-porteuse (Q). Il suffit de voir que la sous-porteuse I est modulée en fait par un signal orangé/bleu-vert et non par le signal $(R - Y)'$ ou $(B - Y)'$, car ceux-ci, comme le montre la fig. 46, correspondent déjà

*) Pour éviter toute erreur de compréhension, on doit ajouter que cette diminution d'aptitude à distinguer les couleurs peut être considérée comme ne s'appliquant qu'à des détails colorés à l'intérieur d'une surface plus grande d'une couleur différente. Lorsque divers détails fins colorés constituent par eux-mêmes une grande surface sous la forme d'un réseau plus ou moins régulier, les lois concernant le mélange additif des couleurs s'appliquent comme telles.

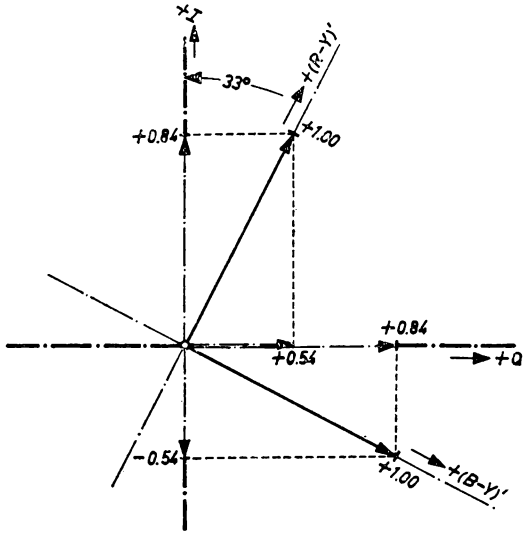


Fig. 49. Séparation de signaux $(R - Y)'$ et $(B - Y)'$ dans la direction des sous-porteuses I et Q (voir texte).

respectivement aux paires complémentaires pourpre/bleu-vert et violet/jaune-vert.

On ne doit pas négliger le fait qu'après tout, les signaux Y, $(R - Y)'$ et $(B - Y)'$ ne représentent qu'une combinaison purement mathématique des trois couleurs primaires R, G et B de toute couleur et que c'est plus ou moins incidemment que les combinaisons $(R - Y)'$ et $(B - Y)'$ correspondent aux couleurs sur les droites pourpre/bleu-vert et violet/jaune-vert respectivement. Il doit cependant être possible, par une méthode mathématique quelconque, de trouver deux nouvelles combinaisons de signaux qui montrent aussi un déphasage de 90° dans la fig. 46, dont l'une correspondrait à la droite orangé/bleu-vert dans ce diagramme (axe I tireté). Cela est tout-à-fait admissible, les conséquences étant neutralisées dans le récepteur.

L'angle entre la droite orangé/bleu-vert et l'axe $(R - Y)'$ est de 33° (fig. 46, 47, 49). D'après la fig. 49, les deux signaux $(R - Y)'$ et $(B - Y)'$ peuvent être séparés en deux composantes, l'une dans la direction de la droite orangé/bleu-vert et l'autre normale à cette droite. Appelons la première direction la direction I et la seconde la direction Q; dans ce cas, la composante I pour

le signal $(R - Y)'$ est égale à $(R - Y)'$ cos 33° = 0,84 $(R - Y)$ et la composante Q est égale à $(R—Y)'$ sin 33° = 0,54 $(R—Y)'$. Pour le signal $(B — Y)'$, la composante I est $(B — Y)'$ (— sin 33°) = — 0,54 $(B — Y)'$ et la composante Q est $(B — Y)'$ cos 33° = 0,84 $(B — Y)'$. Pour transformer les coordonnées $(R — Y)'/(B — Y)'$ en coordonnées I/Q, on doit sommer les composantes I et Q, ce qui nous donne:

$$I = 0{,}84\ (R — Y)' — 0{,}54\ (B — Y)'$$
$$Q = 0{,}54\ (R — Y)' + 0{,}84\ (B — Y)'.$$

Si nous substituons maintenant pour $(R — Y)'$ et $(B — Y)'$ les valeurs des composantes primaires R, G et B avec lesquelles nous sommes devenus familiers (voir page 103), nous avons:

$$I = 0{,}60\ R — 0{,}28\ G — 0{,}32\ B$$
$$Q = 0{,}21\ R — 0{,}52\ G + 0{,}31\ B.$$

A l'aide d'une matrice et de circuits mélangeurs simples, ces signaux I et Q peuvent être produits à partir des trois signaux primaires. C'est sous cette forme définitive que les sous-porteuses I et Q peuvent être modulées pour donner la meilleure image possible. Comme il a déjà été dit, la largeur de bande de la sous-porteuse I est de 1,5 MHz et celle de la sous-porteuse Q de 0,5 MHz. Le signal I est exactement sur la droite orangé/bleu-vert du diagramme de chromaticité et le signal Q sur la droite violet/jaune-vert, autrement sans signification.

Il est évident que les circuits matriciels du récepteur doivent pouvoir reconstituer les signaux $(R — Y)$ et $(B — Y)$ respectivement à partir des signaux I et Q. Un calcul simple nous donne:

$$(R — Y) = 0{,}96\ I + 0{,}62\ Q$$
$$(B — Y) = 1{,}10\ I + 1{,}70\ Q.$$

dans lesquelles est comprise une compensation pour l'atténuation à l'émetteur, d'un facteur 0,877 pour le signal $(R — Y)$ et 0,493 pour le signal $(B — Y)$. Une inversion de polarité et suivie de l'addition de ces signaux dans un circuit matriciel conduisent au signal $(G — Y)$ (voir page 100):

$$(G — Y) = — 0{,}51\ (R — Y) — 0{,}19\ (B — Y).$$

Les signaux $(R — Y)$, $(B — Y)$ et $(G — Y)$ sont combinés finalement avec le signal Y dans trois circuits séparés pour attaquer les trois canons du tube-image couleurs.

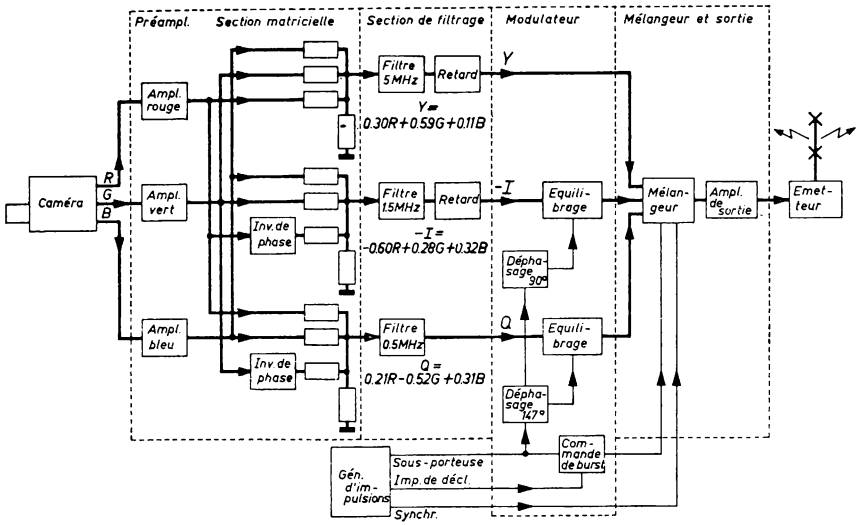


Fig. 50. Diagramme illustrant le trajet du signal à l'émetteur.

Nous avons ainsi terminé notre examen des problèmes principaux. Pour conclure, nous dirons quelques mots des aspects les plus importants de l'émetteur et du récepteur, représentés respectivement par les schémas synoptiques des fig. 50 et 51 réduits à l'essentiel. Les circuits ayant été déjà discutés en détail, ces diagrammes s'expliquent d'eux-mêmes, à l'exception peut-être des lignes de retard qui suivent les étages de filtrage. Chacun de ces étages donne un certain retard au signal appliqué, d'autant plus important que la largeur de bande du filtre est réduite. Le filtre 0,5 MHz dans le canal Q donne donc le plus long retard (plus de 1 μs) et le filtre 5 MHz dans le canal Y le plus court (à peine 0,1 μs). Ces différences de temps de transit sont compensées par des lignes de retard dans les canaux I et Y qui retardent le signal I de quelques dixièmes de microseconde et le signal Y d'environ 1 μs. Cette compensation est nécessaire, non pas tellement pour éviter un décalage des trames colorées que pour éviter une dénaturation des couleurs sur les contours verticaux dans l'image; sinon, pendant ces transitions d'une couleur à une autre, les divers circuits de mélange et matriciels donneraient lieu à des effets totalement incontrôlables.

Nous terminerons nos remarques en comparant les fig. 50 et 51 avec la

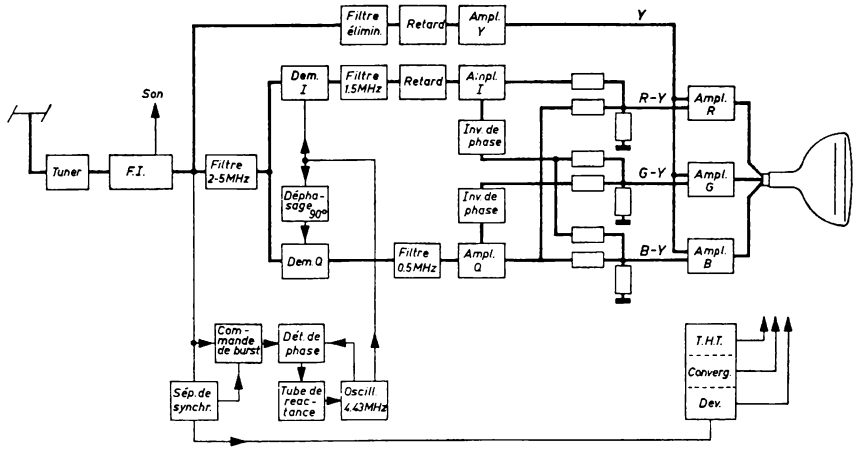


Fig. 51. Trajet du signal dans le récepteur.

fig. 11 (page 27), afin de montrer combien la transmission de la télévision en couleurs est beaucoup plus compliquée par radio qu'en circuit fermé. On donne le nom de *codeur* à cette partie de l'appareillage qui comprend les divers circuits de mélange et matriciels devant combiner les signaux *R*, *G* et *B* des amplificateurs correcteurs pour former les signaux *Y*, *I* et *Q* et convertissent ensuite les deux derniers signaux en une sous-porteuse composite modulée, pour combiner finalement celle-ci avec le signal *Y* pour donner le signal couleurs complet; en fait, les signaux *R*, *G* et *B* sont transposés en un code décodé dans le récepteur.

De même, on appelle *décodeur* la partie du récepteur dans laquelle le signal couleurs composite, obtenu de façon classique par détection A.M., redonne finalement les signaux *R*, *G* et *B*. On comprend que, par dessus tout, le codeur et le décodeur requièrent du réalisateur non seulement une connaissance très approfondie de la théorie, mais aussi beaucoup d'expérience pratique pour assurer la stabilité et la constance de fonctionnement essentielles, de même qu'une faible sensibilité aux perturbations.

Si l'on fait abstraction de l'admiration universelle pour l'ingéniosité qui a rendu possible un tel système de transmission, reste encore l'amère pensée que tant d'efforts aient été dépensés principalement pour trouver une solution à deux problèmes essentiels, l'introduction du signal couleurs dans le canal

de télévision disponible de 7 MHz et ensuite la compatibilité indispensable.

On doit espérer que lorsque la télévision en couleurs sera ultérieurement plus généralisée, l'industrie sera à même de réaliser des récepteurs combinant un prix raisonnable à une stabilité suffisante, avec des dispositifs automatiques permettant d'obtenir une image de qualité satisfaisante pendant très longtemps dans les mains inexpertes du téléspectateur moyen.

LE SYSTEME SECAM

Comme il a été dit dans l'avant-propos, des tentatives furent faites pour parvenir à un accord international sur un standard unique pour la télévision en couleurs européenne, devant être accepté par toutes les nations d'Europe Occidentale qui envisageaient le lancement de la télévision en couleurs.

Comme on le sait celles-ci n'ont pas abouti.

La solution la plus simple aurait consisté à adopter, pour l'Europe, le système américain NTSC, en le modifiant légèrement et en tenant compte du nombre différents de lignes. Cependant, il était utile de faire une étude et une analyse poussées de l'expérience acquise outre-Atlantique depuis plus de dix ans que ce système y était appliqué.

Il est certain qu'une telle étude devait conduire à un nombre de suggestions d'améliorations, en particulier en ce qui concerne un système techniquement compliqué comme le NTSC, dont les avantages et les inconvénients pratiques n'avaient guère pu être prévus au cours de son développement.

L'expérience a montré que le système NTSC possède une caractéristique principale, avec divers effets défavorables, c'est-à-dire sa grande sensibilité aux erreurs de phase dans la sous-porteuse contenant les informations couleurs. Tous les émetteurs et tous les relais doivent donc être équipés de circuits onéreux de correction et de stabilisation de phase; des enregistreurs des signaux vidéo sur bande magnétique doivent être utilisés avec des circuits auxiliaires extrêmement précis pour maintenir constante la vitesse de défilement de la bande (ce qui, en pratique, ne s'est pas avéré jusqu'ici parfaitement satisfaisant); enfin, mais ce n'est pas le moins important, les constructeurs de téléviseurs se trouvent face au difficile problème de réaliser pour un prix raisonnable des récepteurs au montage complexe de haute

qualité, devant répondre aux exigences très sévères de précision et de stabilité, et qui doivent également être aussi automatisés que possible, afin de donner encore de bons résultats dans les mains des profanes. On ne doit pas oublier que ce dernier point, le prix des récepteurs, joue un rôle qui est loin d'être négligeable dans le choix d'un système d'émission pour une utilisation de masse comme la télévision.

Même si les conditions précises de phase du système NTSC sont satisfaites à l'émission et à la réception, il reste encore une autre source d'erreurs de phase dans la sous-porteuse, pratiquement hors de notre contrôle: l'espace dans lequel se propagent les ondes radio entre l'antenne de l'émetteur et celle du récepteur. Par suite des phénomènes de réfraction et de réflexion dans cet espace, on peut à peine s'attendre à ce que les récepteurs très éloignés de l'émetteur reçoivent une seule onde avec un temps de parcours bien défini; le plus généralement, ils recevront un mélange d'ondes ayant des temps de parcours légèrement différents (et probablement variables). Cependant, ces différences de temps de parcours sont synonymes de déphasages et, du fait qu'elles varient généralement avec la longueur d'onde, les rapports de phase dans le spectre latéral de la sous-porteuse modulée peuvent être supposés varier de façon imprévisible.

Dans le récepteur NTSC, la sous-porteuse modulée en quadrature est démodulée par un démodulateur synchrone (voir page 95), lequel implique la génération dans le récepteur d'une oscillation locale rigoureusement en phase avec la sous-porteuse non modulée (dans le codeur de l'émetteur). Cet équilibre de phase est obtenu à l'aide du court train d'ondes (burst) transmis dans le palier avant de l'impulsion de synchronisation de ligne, ainsi que de circuits comparateurs de phase très précis dans le récepteur. Si l'on n'épargne aucun effort dans la réalisation de ces circuits, ceux-ci peuvent suivre toutes les variations imprévisibles de la phase des signaux de «bursts» reçus exactement; ils restent cependant sensibles au bruit et aux interférences d'impulsions, de sorte que dans les zones urbaines où il y a beaucoup de parasites et à grande distance de l'émetteur, il ne peut pas toujours être garanti que l'oscillateur local du récepteur restera en phase avec la sous-porteuse reçue. Cela entraîne une mauvaise démodulation de la sous-porteuse et par suite un rapport incorrect des intensités des signaux I et Q, lequel se manifeste par une reproduction dénaturée des couleurs.

Vers la fin des années 50 (en 1958), les détails d'un système d'émission

reposant sur la même base théorique que le système NTSC, mais dépourvu de cette grande sensibilité de phase, fut publié en France par H. de France. Dans ce système (SECAM = séquentiel à mémoire), l'importance décisive pour son développement était le fait (également utilisé dans le système NTSC) que lorsqu'une image en couleurs est synthétisée d'après un signal de luminance *(Y)* et un signal de chrominance *(I* et *Q)*, la finesse de l'image obtenue est presque exclusivement déterminée par le signal de luminance et très peu par le signal de chrominance (voir page 106). On tire parti de ce fait dans le système NTSC en limitant la largeur de bande du signal *I* à 1,5 MHz et celle du signal *Q* à 0,5 MHz; il est indifférent que ce flou artificiel de l'image en couleurs ne se produise que dans le sens horizontal (c'est-à-dire sur les contours verticaux), car dans le sens vertical, on conserve la finesse déterminée par le nombre de lignes. Dans les cas du système SECAM, on réduit aussi la finesse dans le sens vertical, par une transmission alternée, dans l'ordre de succession des lignes, des deux signaux de couleurs *(R—Y)* et *(B—Y)*, de sorte que la moitié de l'information couleurs d'une ligne est perdue. Nous allons maintenant entrer dans plus de détails, à l'aide de la fig. 52.

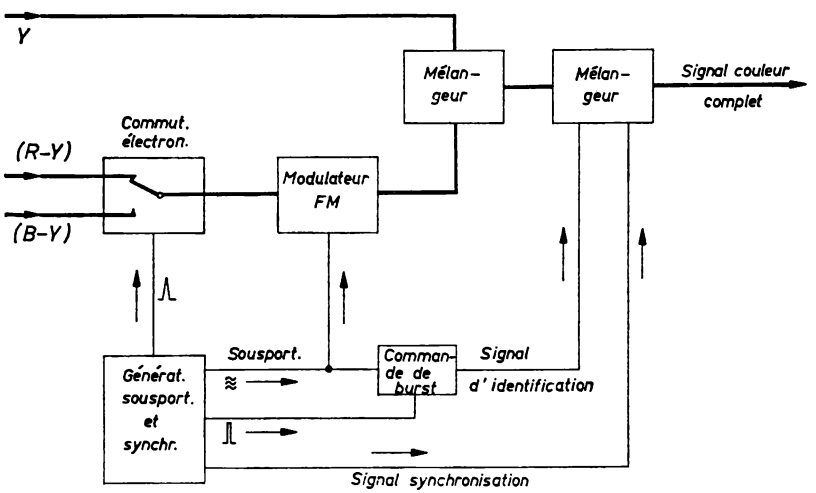


Fig. 52. Principe du codeur SECAM.

L'image est décomposée de façon classique dans la caméra en ses trois composantes primaires de couleur, transformées par les trois tubes de la

caméra en signaux primaires *R*, *G* et *B*. Après avoir été amplifiés et corrigés de façon habituelle (page 54), ces trois signaux sont appliqués au codeur SECAM, où ils donnent naissance, à l'aide de réseaux matriciels, au signal de luminance *(Y = 0,30 R + 0,59 G + 0,11 B)* et aux deux signaux de couleurs *(R—Y)* et *(B—Y)*. Alors que dans le système NTSC, ces deux derniers signaux sont transformés en signaux *I* et *Q*, il n'en est nul besoin dans le système SECAM, car les deux signaux peuvent être transmis avec la même largeur de bande (environ 1,5 MHz; *cf.* page 96*).

Les deux signaux *(R—Y)* et *(B—Y)* parviennent à l'étage modulateur du codeur par l'intermédiaire d'un commutateur électronique (fig. 52); contrairement au codeur NTSC, le codeur SECAM n'agit que sur une seule sous-porteuse et ne nécessite de ce fait qu'un seul modulateur (fig. 52). Le commutateur électronique est commandé de telle sorte par l'impulsion de synchronisation de ligne que les signaux *(R—Y)* et *(B—Y)* parviennent au modulateur par lignes alternées, de sorte que la sous-porteuse est modulée alternativement avec ces deux signaux. Le système SECAM utilise la modulation de fréquence, étant donné qu'en général, une onde modulée en fréquence est moins sensible aux transitoires et autres sortes d'interférences qu'une onde modulée en amplitude. Toutefois, les essais pratiques du système ont montré qu'en fait la modulation de fréquence n'est pas aussi supérieure à la modulation d'amplitude qu'on le pensait. Le fréquence centrale de la sous-porteuse est la même que dans le système NTSC (valeur suggérée pour l'Europe 4 429 687,5 Hz), l'excursion de fréquence est d'environ 750 kHz et les bandes latérales sont limitées à environ 1,5 MHz. Etant donné que nous avons affaire à une simple onde porteuse modulée en fréquence, il n'est pas nécessaire de prévoir des mesures spéciales en un point quelconque du parcours de l'onde pour maintenir la constance de la phase à une valeur particulière. Comme dans le système NTSC, la sous-porteuse modulée est combinée avec le signal de luminance présent à pleine largeur de bande (environ 5 MHz) et, après addition de l'impulsion de synchronisation et du «burst», appliquée à l'émetteur RF comme modulation.

Un signal «burst» est également utilisé dans le système SECAM (voir

---

*) Les largeurs de bande étant les mêmes, les temps de parcours des deux signaux dans les amplificateurs correspondants sont identiques, ce qui supprime le besoin de lignes à retard pour le signal *I* utilisées dans les codeurs et décodeurs NTSC (voir page 112).

page 91), bien que le récepteur n'ait pas d'oscillateur local, mais il sert de fréquence de référence*); dans ce cas, le «burst» joue plutôt le rôle de signal repère pour la synchronisation de phase du commutateur électronique du décodeur du récepteur SECAM, dont la commutation doit s'effectuer en phase avec le commutateur correspondant de l'émetteur, de telle sorte que le signal *(R—Y)* puisse être distingué du signal *(B—Y)*. Cette synchronisation peut être simplement obtenue en transmettant un «burst» après chaque seconde ligne, par exemple juste avant le signal *(R—Y)*.

Le signal transmis dans le système SECAM est donc constitué par le signal de luminance *Y*, entrelacé comme le système NTSC avec les signaux de chrominance *(R—Y)* et *(B—Y)*; toutefois, ces deux derniers signaux sont maintenant transmis successivement sur lignes alternées. Dans le récepteur SECAM, ces deux signaux de chrominance sont retransformés en signaux simultanés de la façon suivante (voir fig. 53):

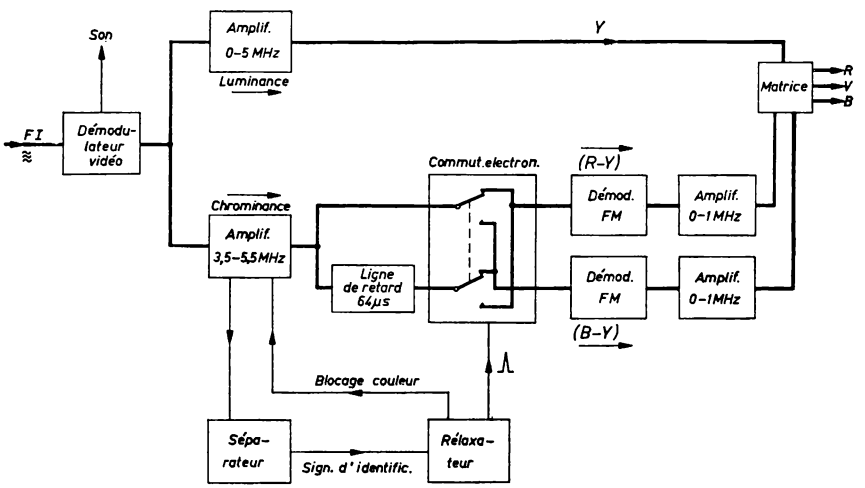


Fig. 53. Principe du décodeur SECAM.

Après l'amplification normale RF et FI, le signal vidéo couleurs composé démodulé dans le détecteur vidéo du récepteur est appliqué à deux canaux:

*) Dans la sous-porteuse modulée en fréquence, la fréquence centrale est plus ou moins préservée suivant le taux de modulation; dans le système NTSC, la fréquence de la sous-porteuse est complètement éliminée par utilisation de circuits modulateurs équilibrés (voir page 91).

d'une part le canal *Y*, qui est fondamentalement le même que dans le récepteur NTSC et comme tel conduit au réseau matriciel et après au tube-image et d'autre part le canal de chrominance, avec lequel son filtre passe-bande d'environ 3,5 à 5,5 MHz laisse passer principalement la bande de fréquences de la sous-porteuse FM (fréquence centrale environ 4,43 MHz), c'est-à-dire les signaux de couleurs séquentiels (sur lignes alternées) *(R—Y)* et *(B—Y)*. Ce canal amplificateur attaque d'une part directement, et d'autre part par une ligne à retard les deux bornes d'un commutateur électronique bipolaire (fig. 53). Cette ligne à retard retarde le signal qui lui est appliqué d'un temps correspondant exactement à une ligne, soit pour le standard européen à 625 lignes, environ 64 μs.

Il est évident que les exigences les plus sévères sont apportées à la constance de cette ligne à retard; si, par exemple, par suite de variations de température ou de vieillissement, le temps de parcours ne correspond plus à une ligne exactement, la finesse des contours verticaux peut être détériorée de façon inadmissible, un doublage des contours pouvant même être observé. Précédemment, les lignes à retard étaient réalisées avec des tiges ou des lames de quartz, mais elles sont aujourd'hui faites surtout de tiges de verre ou d'acier de longueur définie avec précision. Leur principe de fonctionnement est toujours basé sur une combinaison de l'effet piézoélectrique (conversion de tensions alternatives en vibrations mécaniques) et de la propagation d'ondes ultrasoniques dans la matière en question*).

Etant donné que le signal de chrominance dans le système SECAM est constitué par une série séquentielle des signaux *(R—Y)* et *(B—Y)* en lignes alternées, un signal *(R—Y)* et un signal *(B—Y)* sera toujours présent aux deux bornes du commutateur électronique, chaque signal se présentant alternativement à l'une puis à l'autre borne et ne provenant pas de la même ligne, mais de deux lignes successives. On voit maintenant comment le signal de chrominance séquentiel peut être converti en un signal simultané: si le commutateur électronique bipolaire est commuté à la fin de chaque ligne, il y aura toujours un signal *(R—Y)* à une sortie et un signal *(B—Y)* à l'autre. On verra également que le signal d'une ligne donnée sera toujours présent à la sortie appropriée pendant deux durées successives de lignes, une fois par

---

*) Les tiges en verre spécial ne font pas varier le temps de parcours de plus de 0,001 μ s (= 1 ns) lorsque la température varie d'environ 20 °C; toutefois, de telles tiges sont onéreuses, ce qui n'est pas sans importance dans l'industrie des récepteurs de télévision.

le canal direct et une autre fois par la ligne à retard. L'information fournie par les signaux *(R—Y)* et *(B—Y)* est ainsi perdue à chaque ligne, de sorte que la définition chromatique dans le sens vertical est réduite de moitié.

Comme nous l'avons déjà dit, cette perte de définition n'est normalement pas perceptible. On ne doit cependant pas oublier que le système SECAM utilise aussi l'entrelacement, ce qui conduit au combinaison de deux paires de lignes entrelacées sur l'écran du tube-image. Cet effet déplaisant peut être très nettement observé sur des contours horizontaux ou presque horizontaux accusés, surtout lorsqu'ils correspondent à une transition entre des couleurs complémentaires très saturées.

Les deux sorties du cummutateur électronique sont reliées aux canaux *(R—Y)* et *(B—Y)* du récepteur. Ces deux canaux sont réalisés de façon identique, comprenant chacun un détecteur FM et les étages amplificateurs appropriés et attaquant les réseaux matriciels avant le tube-image. Comme dans le système NTSC, ces réseaux matriciels combinent les signaux ci-dessus mentionnés avec le signal *Y* pour donner les signaux primaires *R*, *G* et *B* qui commandent les trois systèmes d'électrodes du tube-image.

La fig. 53 montre également un autre canal (en trait mince) qui sert à la fois à la synchronisation de phase du commutateur électronique et au blocage du canal de chrominance lors de la réception d'un signal noir et blanc (principe de la compatibilité). A l'aide d'une impulsion provenant de la base de temps, le signal de commande est séparé du signal de chrominance et utilisé pour déclancher un multivibrateur monostable. La tension rectangulaire de sortie de ce dernier commande le commutateur électronique. Comme le signal de commande ne se produit qu' après chaque seconde ligne, par exemple toujours après le signal *(B—Y)*, la séquence des commutations est ainsi déterminée de telle sorte que les signaux *(R—Y)* et *(B—Y)* sont cetains d'atteindre les canaux d'amplification et les réseaux matriciels corrects. Seuls, des transitoires parasites intenses sont susceptibles de perturber le déclanchement du multivibrateur et donc du commutateur, ce qui entraînerait un rendu des couleurs défectueux.

Dans une version modifiée du système SECAM, un court signal en dents de scie est transmis à la fin de chaque ligne comme signal de commande, au lieu d'un «burst». Si l'un des deux signaux couleurs (par exemple *(R—Y)*) est maintenant modulé et transmis en polarité inverse, le signal en dents de scie, après démodulation dans le récepteur, n'aura la polarité correcte que si le

commutateur électronique est convenablement synchronisé. Sinon, c'est-à-dire si le signal en dents de scie n'a pas la bonne polarité, il agit comme tension de commande, plaçant le commutateur électronique en phase correcte.

Comme il arrive souvent dans les développements techniques, on s'est aperçu par la pratique que le système SECAM n'avait pas que des avantages comparé au système NTSC, mais aussi des inconvénients qui avaient été négligés au cours des études théoriques.

Par exemple, une propriété défavorable du système SECAM est la présence de la sous-porteuse dans le signal reçu, avec une amplitude croissante lorsque la saturation d'une couleur diminue et qui devient maximale pour le blanc. En particulier, lorsqu'un tel signal est reçu par un récepteur noir et blanc, un réseau très gênant apparaît sur l'écran du tube-image. Dans le système NTSC, la fréquence de sous-porteuse est complètement supprimée par le modulateur équilibré et seules sont transmises les fréquences latérales. Leur amplitude diminue avec la saturation des couleurs, en général à 10 à 20% de l'amplitude maximale, et disparaît complètement pour le blanc. Cet effet gênant peut être réduit en couplant la fréquence de sous-porteuse SECAM avec un multiple impair de la moitié de la fréquence de lignes (voir page 80).

Une autre amélioration est obtenue en ajoutant un circuit filtre à flancs abrupts qui supprime, au moins en partie, la fréquence centrale et les bandes latérales les plus basses de la sous-porteuse FM. Naturellement, cette atténuation artificielle supplémentaire doit être compensée par une amplification appropriée de ces fréquences dans le récepteur. Toutefois, cela a un effet gênant sur le rapport signal/bruit; on a essayé d'améliorer cette situation par une préaccentuation très poussée sur les fréquences de modulation les plus élevées; l'allure de fréquence résultant des canaux d'amplification dans l'émetteur et le récepteur entraine alors une mauvaise caractéristique de saut; il se produit facilement des marges colorées et des étalements des contours verticaux, notamment à la limite entre deux couleurs fortement saturées et de contrastes accusés.

Les difficultés ci-dessus mentionnées peuvent être surmontées par une modification du système SECAM proposée par Telefunken (W. Bruch), dans laquelle la modulation de fréquence de la sous-porteuse est remplacée par une modulation en quadrature (AM), comme dans le système NTSC, mais

avec l'alternance de lignes des deux composantes en quadrature. Il n'est donc plus nécessaire d'avoir une démodulation synchrone dans le récepteur, de sorte que le système ne craint pas plus d'erreurs de phase que le système SECAM à FM. Toutefois, le récepteur nécessite un oscillateur local comme dans le système NTSC; il ne doit pas nécessairement être en phase avec la sous-porteuse de l'émetteur, mais il doit avoir la même fréquence, de sorte que la simplicité originale du système SECAM est ainsi perdue.

Une dénaturation des couleurs se produit dans le système SECAM, en particulier dans les couleurs faiblement saturées et dans le blanc, lorsque les fréquences d'accord des deux détecteurs FM du décodeur du récepteur ne correspondent pas exactement avec la fréquence centrale de la sous-porteuse émise. Pour résoudre ce problème, on doit prévoir des circuits de commande très précis et stables ou, si le signal de commande est constitué par un court train d'ondes de la fréquence de sous-porteuse, il faut disposer d'un circuit comparateur de phase. Chacune de ces solutions restreint encore la simplicité du système SECAM.

Des essais pratiques poussés du système SECAM ont été faits ces dernières années dans divers pays d'Europe. On a conclu en général qu'un bon récepteur SECAM n'a pas un prix de revient inférieur à celui d'un récepteur NTSC, mais qu'il est plus simple à utiliser. Dans les régions de bonne réception, les deux systèmes peuvent donner des résultats identiques; dans celles où elles sont moins bonnes, les inconvénients qui se manifestent peuvent orienter le choix suivant les goûts personnels, en admettant la dénaturation croissante des couleurs avec le système NTSC ou l'interférence désagréable du bruit avec le système SECAM.

Cependant, le système SECAM présente des avantages très nets en ce qui concerne l'enregistrement magnétique des programmes de télévision en couleurs. Aujourd'hui, l'enregistrement magnétique des programmes de télévision noir et blanc est largement répandu et l'on peut s'attendre à ce qu'il prenne une importance comparable avec la couleur. Avec le système NTSC, l'enregistreur vidéo doit comporter des circuits de commande extrêmement compliqués pour maintenir constantes les vitesses de la bande et des têtes, ou des lignes à retard réglable, étant données les exigences très strictes concernant la phase; jusqu'ici, aucune de ces deux solutions n'a été satisfaisante.

Notons toutefois que c'est précisément dans cette question de l'enregis-

trement des programmes que nous trouvons le plus grand inconvénient du système SECAM, c'est-à-dire la difficulté de le transcrire pour le système NTSC, ce qui est nécessaire en vue des échanges de programmes entre l'Europe et les Etats-Unis (ou le Japon et les autres pays qui adopteraient le système NTSC). Il est donc à peine surprenant que la commission spéciale de l'U.E.R. n'a pas encore pu prendre une décision formelle pour l'un ou l'autre système. Entre temps, la situation s'est modifiée depuis trois ans et il ne s'agit plus d'un choix entre deux seuls systèmes. Un troisième est entré en lice, le système PAL, proposé par W. Bruch (Telefunken) et dont nous allons maintenant parler.

LE SYSTEME PAL

Alors que le système SECAM peut être considéré comme une tentative de réduire la complication technique du système NTSC, le système PAL*) est en fait un peu plus compliqué que le système NTSC. Toutefois, ce nouveau procédé est largement indépendant des erreurs de phase, tout en évitant le stade intermédiaire de la transmission séquentielle des deux signaux couleurs, de sorte que la finesse des couleurs dans le sens vertical est conservée pour la plus grande part; nous allons voir pourquoi elle ne l'est pas en totalité.

Notre description du système PAL doit partir du fait que le décalage des couleurs dans le système NTSC est dû aux «erreurs différentielles de phase» de la sous-porteuse modulée, c'est-à-dire aux rotations inégales de phase des fréquences individuelles du spectre de fréquences comprenant les bandes latérales supérieure et inférieure et la fréquence centrale de la porteuse, transmises sous la forme du «burst». Dans des conditions défavorables de transmission, le déphasage entre les fréquences latérales inférieures des signaux I et Q, la fréquence du «burst» et les fréquences latérales supérieures dans le récepteur diffère ainsi de celui de l'émetteur. Comme en général les spectres latéraux des signaux I et Q contiennent les mêmes fréquences (mais non les mêmes amplitudes!), on peut supposer que les erreurs de phase résultantes pour ces signaux sont égales, de sorte qu'ils restent plus ou moins en quadrature. Cela n'est toutefois pas exact pour la seule fréquence de sous-porteuse transmise comme le «burst». Il en résulte en général un déphasage avec les signaux I et Q dans le récepteur qui ne correspond plus à la modulation originale dans le codeur. La fig. 54 illustre ce fait au moyen de diagrammes de phase; pour simplifier, la phase du «burst» est toujours indiquée verticale.

La fig. 54*a* montre les rapports de phase dans le codeur; nous rappellerons

*) PAL = phase alternating line.

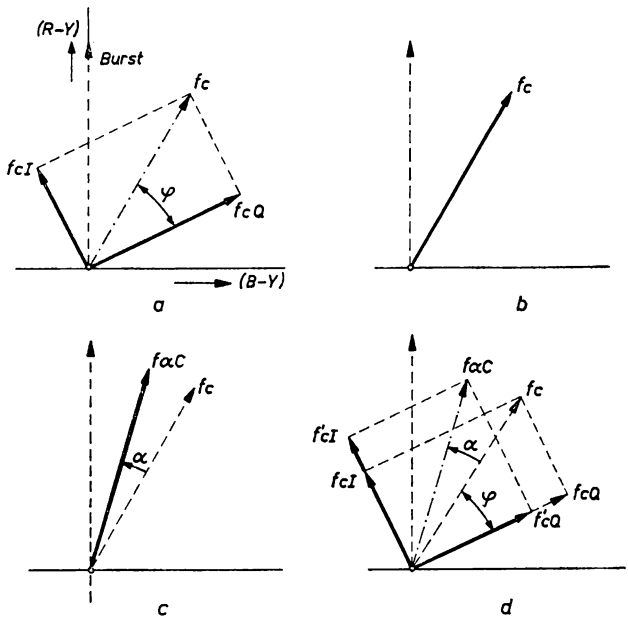


Fig. 54. Rapports de phase entre la sous-porteuse de chrominance f_c et le «burst» lorsque des erreurs différentielles de phase se produisent au cours de la transmission.
φ = angle de phase entre la sous-porteuse et l'axe Q.
a) Phases correctes dans le codeur.
b) Phases correctes à l'antenne de l'émetteur.
c) Situation à l'antenne du récepteur lorsque la sous-porteuse a tourné d'un angle α (erreur de phase).
d) Dans les démodulateurs synchrones du décodeur, la sous-porteuse est démodulée suivant les composantes incorrectes f'_{cI} et f'_{cQ}, (f_{cI} et f_{cQ} = valeurs correctes).

au lecteur que les axes *IQ* sont tournés de 33° par rapportaux axes *(R—Y)/(B—Y)*, donc par rapport à la sous-porteuse («burst») (voir page 110). La fig. 54*b* montre la situation à l'antenne d'émission, où nous trouvons, indépendamment des trains d'ondes émis périodiquement du «burst» (ligne tiretée), l'onde sous-porteuse modulée en amplitude et en phase (l'onde porteuse principale n'a pas été représentée, n'ayant pas de signification dans ce cas particulier). Nous pouvons remarquer que le vecteur f_c de la fig. 54*b* peut être considéré comme représentant toutes les fréquences latérales *I* et *Q* et non la fréquence de sous-porteuse elle-même, laquelle est supprimée dans le codeur par les modulateurs équilibrés.

Si ces fréquences latérales subissent une rotation de phase non uniforme au cours de la transmission, le résultat au récepteur sera un déphasage par rapport au «burst» (fig. 54*c*). Les démodulateurs synchrones du récepteur, qui fonctionnent en phase avec le «burst», donneront ainsi lieu à une paire de composantes I/Q (à 33° et (33—90°)) avec un mauvais rapport d'amplitudes (fig. 54*d*).

Or, le système PAL utilise l'artifice suivant pour compenser l'erreur de phase entre le «burst» et la sous-porteuse: le signal de sous-porteuse à

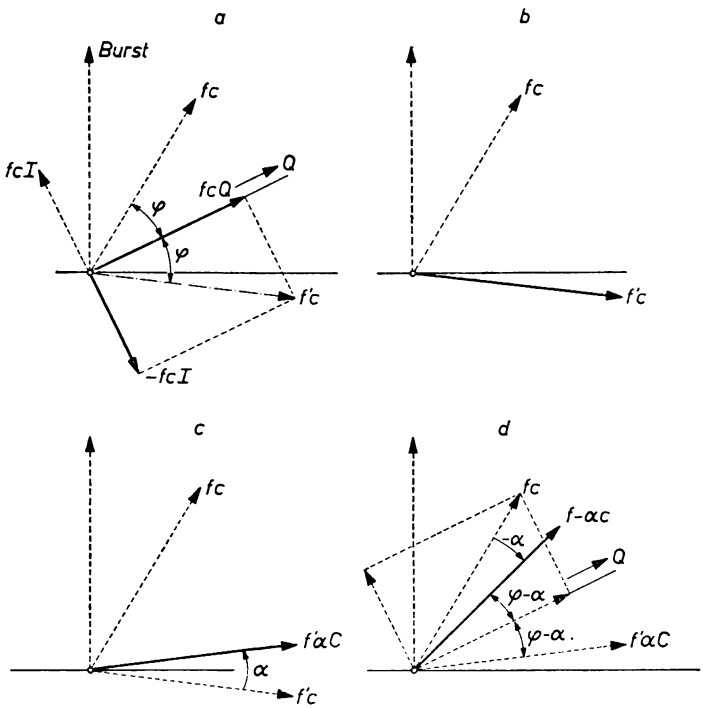


Fig. 55. Rapports de phase de signaux avec erreurs différentielles de phase lorsque la composante I de la sous-porteuse de chrominance est «répétée» sur l'axe Q, suivant le système PAL (*cf.* fig. 54). f_C (ligne tiretée mince) = sous-porteuse non répétée; f'_C = sous-porteuse répétée. Autres symboles comme à la fig. 54.
a) au codeur.
b) à l'antenne d'émission.
c) à l'antenne de réception.
d) après la seconde répétition dans le décodeur du récepteur, l'erreur de phase est en sens inverse (— *a*) de celle de la sous-porteuse non répétée.

transmettre est «répété»*) sur l'un des axes, par exemple l'axe Q, après chaque seconde ligne à l'aide d'un commutateur électronique. On y parvient par une simple inversion de phase de la fréquence de sous-porteuse I (fig. 55*a*). Cette sousporteuse «répétée» subit au cours de la transmission la même rotation de phase α que la sous-porteuse non répétée et parvient ainsi au récepteur comme l'indique la fig. 55*b*. Si l'on répète maintenant le signal sur l'axe Q après chaque seconde ligne dans le récepteur, la sous-porteuse doit revenir à sa phase originale s'il n'y a pas d'erreur de phase. Toute erreur de phase observée doit cependant être de signe opposé à celle de la sous-porteuse non répétée de la fig. 54. Cela est explicité à la fig. 55*d*, à l'aide du vecteur de phase original de la sous-porteuse (ligne tiretée mince) et ses composantes originales.

Une idée évidente est de combiner les sous-porteuses des fig. 54*c* et 55*c* avec leurs erreurs de phase «conjuguées» pour annuler ces dernières. Le

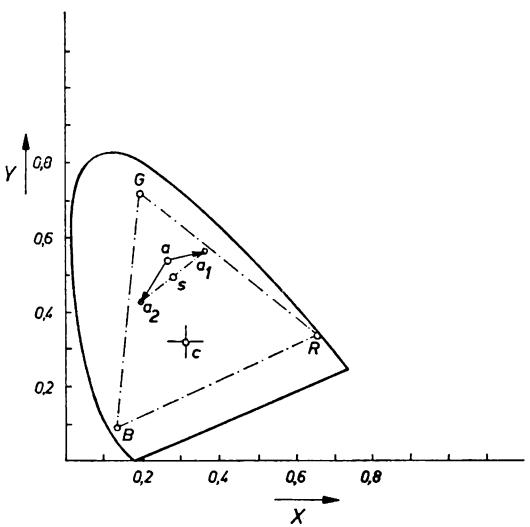


Fig. 56. Compensation approchée du système PAL simple, basée sur la persistance rétinienne. a = point de couleur correct dans le diagramme de chromaticité; a_1, a_2 = points de couleurs produits au cours des lignes alternées sur l'écran du récepteur en présence d'une erreur de phase dans la sous-porteuse (répétée et non répétée); s = moyenne de a_1 et a_2, formée par l'oeil et ne différant que peu de la valeur correcte a.

*) Du point de vue mathématique, le signal de sous-porteuse «répété» est la conjuguée complexe de l'original.

moyen le plus simple d'y parvenir consiste à faire se succéder rapidement les images obtenues d'après les deux sous-porteuses, en tenant compte de la persistance rétinienne: les couleurs dénaturées correspondant aux erreurs de phase conjuguées alternent si rapidement que l'oeil ne peut les suivre, mais perçoit une teinte quelque part entre elles, correspondant plus ou moins à la couleur originale. Cette compensation approchée des deux erreurs de phase est représentée dans le diagramme de chromaticité de la fig. 56. On ne pourrait avoir une compensation totale que si le rapport entre les systèmes de coordonnées de la sous-porteuse et du diagramme de chromaticité était linéaire.

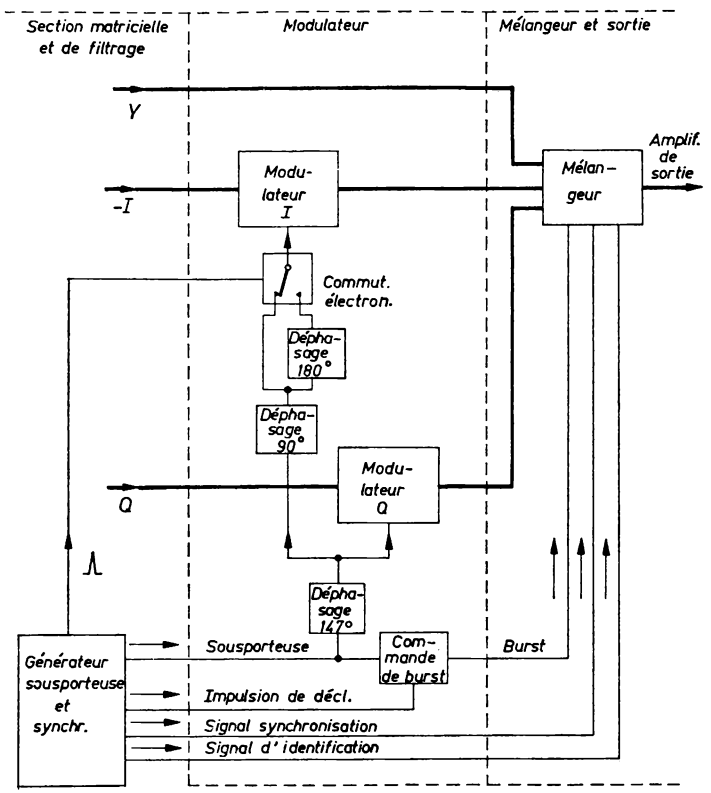


Fig. 57. Adjonction d'un codeur NTSC à un codeur PAL (*cf.* fig. 50).

En pratique, cette méthode de compensation convient très bien pour des erreurs de phase pouvant se monter jusqu'à environ 25°; au-delà, une structure de lignes devient nettement visible et un papillottement gênant se manifeste le long des contours approximativement orienté dans la direction des lignes.

Dans cette version simple du système PAL, le codeur et le décodeur ne diffèrent de leurs homologues du système NTSC surtout que par la présence du commutateur électronique supplémentaire pour l'inversion de phase de la fréquence de sous-porteuse *I*. De plus, dans le système PAL, un autre signal de commande doit être transmis en plus du «burst» pour la synchronisation

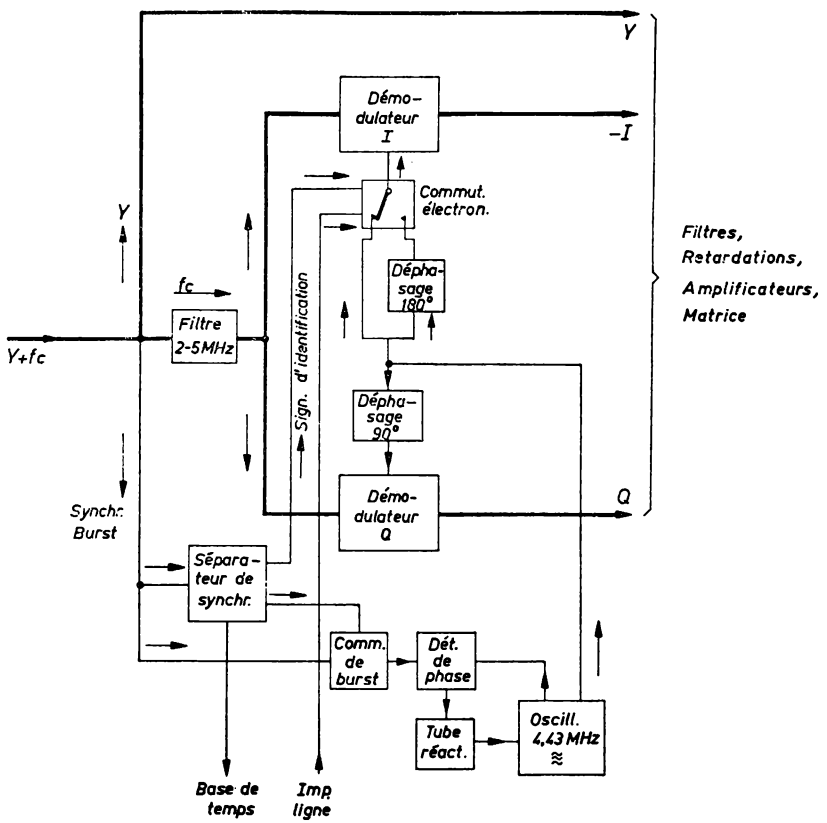


Fig. 58. Adjonction d'un décodeur NTSC à un décodeur PAL (*cf.* fig. 51).

du commutateur électronique dans le codeur et le décodeur. N'ayant pu trouver d'emplacement plus favorable, on transmet ce signal pendant le retour vertical du spot. Cela représente un inconvénient par rapport au système SECAM: si dans celui-ci une transitoire intense dérègle le commutateur électronique, la correction en est effectuée par le signal de commande après tout au plus deux lignes; mais dans le système PAL, le signal *I* est déphasé de 180° pour le reste des lignes avant le retour vertical suivant. Les fig. 57 et 58 montrent sous forme de schémas-blocs les adjonctions qui doivent être faites au codeur et décodeur NTSC respectivement pour pouvoir être utilisés avec le système PAL.

Les erreurs de phase conjuguées peuvent être compensées presque à la perfection sans faire appel à la persistance rétinienne, si l'on ajoute une ligne à retard de précision au décodeur PAL, comme le montre le schéma-bloc de la fig. 59. La sous-porteuse f_c est dirigée sur trois canaux: un canal à retard qui retarde le signal d'une période de ligne (64 μs), un canal sans retard f_{cQ} et un canal f_{cI}, également sans retard, qui inverse la phase du signal f_c. Le fonctionnement de ce système est explicité à la fig. 60 à l'aide de diagrammes de phase, montrant comment l'un des étages mélangeurs de la fig. 59 produit la composante f_{cI} ($\pm$ 2 f_{cI}) avec phase alternée, l'autre étage produisant la composante f_{cQ} ($\pm$ 2 f_{cs}) avec phase constante. Les trois colonnes *a* à *c* de cette figure montrent les rapports de phase aux points suivants du décodeur: *a)* aux entrées des trois canaux parallèles mentionnés ci-dessus; *b)* aux entrées des deux étages mélangeurs, avec le canal f_{cI} en

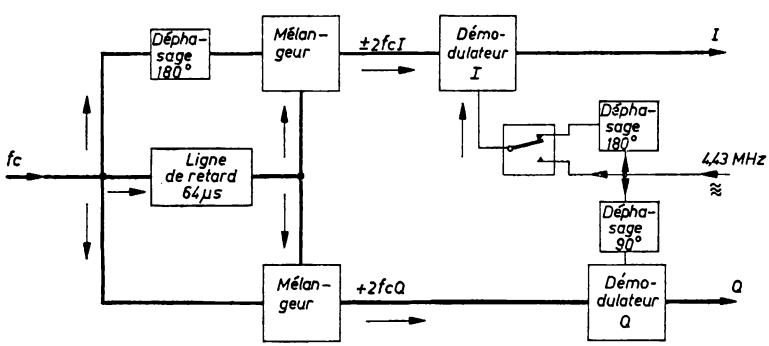


Fig. 59. Principe d'un décodeur PAL pour la compensation totale d'une erreur de phase.

haut, le canal à retard au milieu et le canal f_{cQ} en bas; *c*) aux sorties des deux étages mélangeurs.

On voit clairement d'après cette figure que dans l'étage mélangeur f_{cI}, les composantes f_{cQ} s'annulent toujours, tandis que les composantes f_{cI} doublent leur amplitude, la phase s'inversant à chaque ligne successive; dans le mélangeur f_{cQ}, les composantes f_{cI} s'annulent et les composantes f_{cQ} restantes doublent leur amplitude et sont à phase constante (correcte). L'inversion de phase de la composante f_{cI} par lignes alternées nécessite la rétention du commutateur électronique dans le décodeur PAL, pour inverser

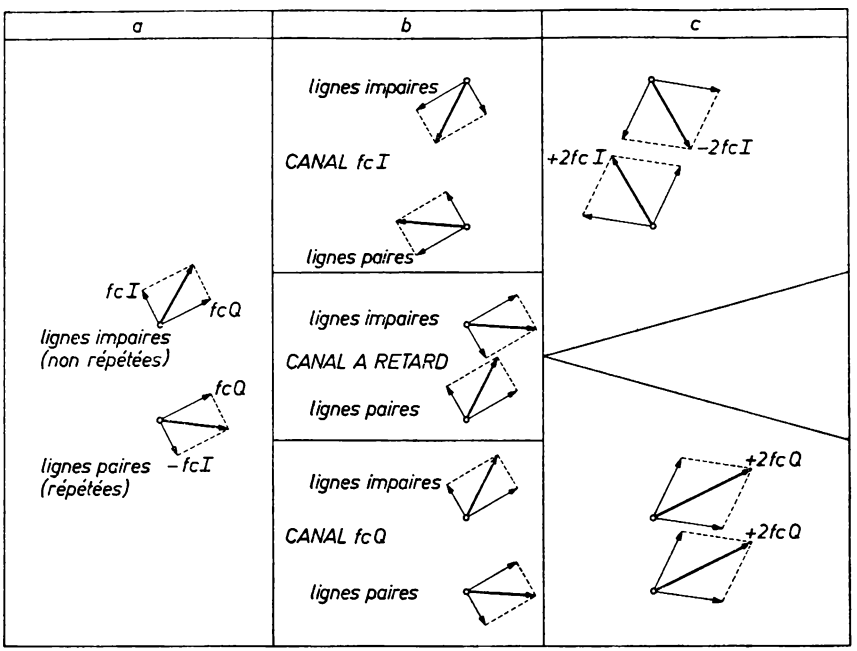


Fig. 60. Diagramme de phase pour le circuit de la fig. 59 en l'absence d'erreurs de phase.
a) Signal incident à séquence de lignes avant sa répartition dans les trois canaux;
b) Signaux dans les trois canaux avant l'entrée dans les étages mélangeurs (la phase étant inversée dans le canal f_{cI}, retardée d'une période de ligne – 64 μs – dans le canal à retard et sans modification dans le canal f_{cQ});
c) Signaux aux sorties des étages mélangeurs. En haut, somme des canaux f_{cI} et à retard; en bas, somme des canaux f_{cQ} et à retard. Dans le canal f_{cI}, les composantes f_{cQ} s'annulent, tandis que les composantes f_{cI} s'annulent dans le canal f_{cQ}.

la phase de la sous-porteuse pour le démodulateur synchrone *I* par lignes alternées, de sorte que ce démodulateur donne toujours un signal *I* en phase correcte.

La fig. 60 donne les rapports de phase pour le cas idéal où aucune erreur différentielle de phase ne se produit au cours de la transmission. Si de telles erreurs se présentent, elles sont corrigées par le circuit ci-dessus, comme le montre la fig. 61. Dans celle-ci, les rapports de phase corrects indiqués sur la fig. 60 sont reproduits en lignes minces pour faciliter la comparaison. La fig. 61 comporte également une nouvelle colonne *d*, qui montre les signaux

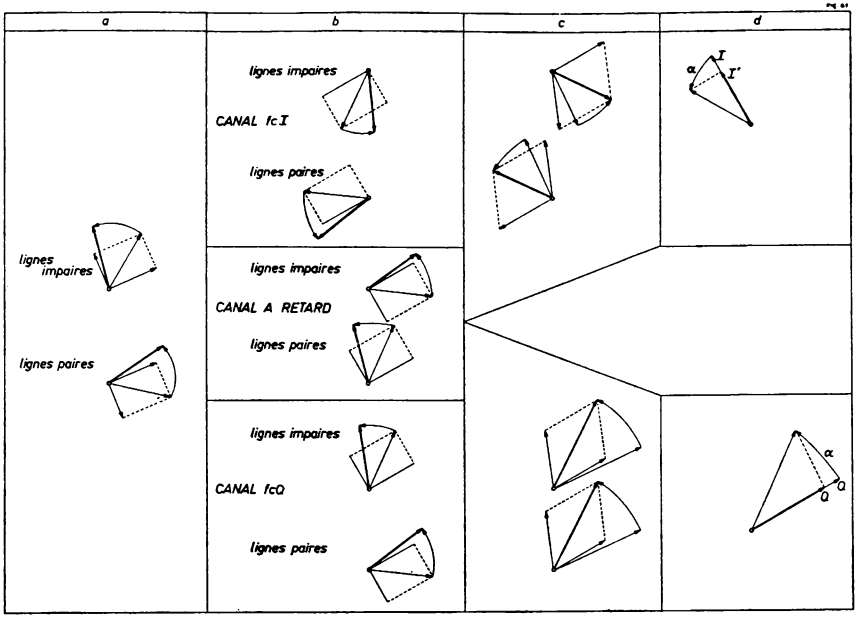


Fig. 61. Diagramme de phase pour le circuit de la fig. 59 en présence d'une erreur de phase. Les colonnes *a*, *b* et *c* comme à la fig. 60. La colonne *d* montre la situation aux deux démodulateurs synchrones: la polarité alternée du signal f_{cI} (voir colonne *c*) est inutile du fait de l'inversion séquentielle de lignes du démodulateur *I*, de sorte qu'il n'y a aucune différence entre les lignes paires et impaires dans le canal f_{cI}, comme dans le canal f_{cQ}. Etant donné que les composantes incorrectes $2\,f'_{cI}$ et $2\,f'_{cQ}$ sont décalées toutes deux du même angle α par rapport aux composantes correctes $2\,f_{cI}$ et $2\,f_{cQ}$, les signaux démodulés *I* et *Q* ont des amplitudes relatives correctes, mais des amplitudes absolues légèrement réduites. Comparer cette démodulation avec la démodulation normale NTSC représentée à la fig. 54*d*.

I et *Q* fournis par les deux démodulateurs synchrones. Les valeurs correctes de signal avec les phases correctes se trouvent aussi dans la colonne *d* (lignes minces); on voit que les amplitudes relatives des signaux *I* et *Q* dans le signal défectueux sont les mêmes que dans le signal propre, mais que leurs valeurs absolues sont plus petites. Cela signifie qu'en dépit de l'erreur introduite la couleur reste la même, à l'exception d'une légère diminution de la saturation.

Avec sa double «répétition» (dans le codeur et le décodeur) à séquence de lignes du signal *I* sur l'axe *Q*, le système PAL compense non seulement les erreurs différentielles de phase, mais aussi celles dues à la diaphonie entre les canaux *I* et *Q*. De telles erreurs peuvent être produites dans les démodulateurs synchrones si les bandes latérales des composantes en quadrature ne sont pas rigoureusement symétriques. Dans le système normal NTSC, une telle diaphonie est toujours présente, bien qu'en général assez faible. La compensation du système PAL est si puissante qu'il est même possible d'utiliser une modulation à bande latérale unique pour les signaux de couleurs *I* et *Q*. Il serait alors possible de reporter la fréquence actuelle de la sous-porteuse (environ 4,43 MHz) à l'extrémité du canal vidéo, soit environ 5 MHz*).

On ne doit pas oublier que les avantages mentionnés ci-dessus du système PAL sont très onéreux. Dans le récepteur en particulier, les frais entraînés par la ligne à retard (qui doit être beaucoup plus précise que dans le système SECAM**) et le commutateur électronique avec sa synchronisation de phase sont très élevés.

Cependant, le décodeur PAL modifié souffre de la même faute fondamentale que le décodeur SECAM, c'est-à-dire la combinaison de l'information couleurs de deux lignes successives: les contours horizontaux et presque horizontaux entre couleurs très saturées sont particulièrement mal reproduits, du fait de l'entrelacement. Nous voudrions toutefois mentionner aussi deux

---

*) Avec une modulation à bande latérale unique, les deux signaux couleurs pourraient être transmis avec la même amplitude, ce qui permettrait d'omettre la transformation des signaux *(R—Y)* et *(B—Y)* en signaux *I* et *Q*, comme le pourraient les lignes à retard pour le canal *I* dans le codeur et le décodeur.

**) Une ligne à retard SECAM nécessite une constance de 25 ns, soit 0,4 % de la valeur nominale, pour un décalage admissible d'un quart de point d'image; par ailleurs, une ligne à retard PAL doit rester constante dans la limite d'environ 2,5 ns, soit 0,04 % de la valeur nominale, par suite des conditions strictes de phase de la fréquence de sous-porteuse retardée.

autres avantages du système PAL qui pourraient être importants à l'avenir: la facilité avec laquelle il peut être transformé en système NTSC (échange de programmes) et la possibilité d'enregistrement magnétique avec un appareillage légèrement moins compliqué que pour le système NTSC.

Les essais pratiques montrent que le système PAL est supérieur aux deux autres lorsque les conditions de réception sont très mauvaises, mais on n'a pas suffisamment étudié cette question jusqu'ici pour permettre un choix définitif entre ce système et les autres.

INDEX

Aimants de correction 70
Angström (Å) 2
Axe – *I* 109
Axe – *Q* 109

Blanc Standard A – B – C 17
Brillance 21
Burst 91

Calage des couleurs 50
Candela (cd) 21
C.B.S. (Columbia Broadcasting System) 58
cd/m² = candela/mètre carré 25
Coefficients trichromatiques 12
Chrominance, signal de . . . 76, 85, 102
C.I.E. (Commission Internationale de l'Eclairage) 11
Circuit fermé 27
Codeur 113
Compatibilité 59, 79, 98, 102
Composantes chromatiques 10
Convergence dynamique 65
Convergence statique 64
Coordonnées *x*, *y* 16
Coordonnées *X*, *Y*, *Z* 16
Couches dichroïques 36
Couches interférentielles 36
Couleur composite, signal de 55
Couleur, nuance d'une 20, 85
Couleur, phases de 103
Couleur, saturation d'une . . . 3, 20, 85
Couleurs, triangle des 16
Couleurs, calage des 50
Couleurs, coefficients de 12
Couleurs complémentaires 9
Couleurs, discriminateur de 29
Couleurs mélangées 3
Couleurs pourpres 17
Couleurs primaires 10, 29
Couleurs spectrales 3
Courbe de luminosité relative 13
Cyan 101

Décodeur 113
Démodulateur synchrone 92, 95
Diagramme de chromaticité 16
Discriminateur de couleurs 29
Distorsion en «S» 51
Distorsion en rhombe 51
Distorsion en tonneau 51
Distorsion en coussin 51
Distorsion en trapèze 51

E.B.U. 115
Echelle de gris 50
Eclairement 26
Eidophore, système 75
Energie radiante 12, 14
Enregistrement magnétique 123
—— vidéo 123
Erréur de phase 116
—— différentielles de phase 125

F.C.C. (Federal Communications Commission) 58
Flux lumineux 12, 22
Foot-Lambert 25

Gamma du système 48

Illuminant Standard A – B – C . . . 17
Information chromatique 76
Information de luminance 76
Intensité lumineuse 21

Lambert-Pied 25
Ligne de retard 112, 120, 132
Linéarité du système 46
Longueur d'onde dominante 17
Longueur d'onde négative 17
Lumen 22
Lumière négative 12
Luminance 14, 21, 25
Luminance, signal de 76, 78, 102
Luminosité 14, 21, 25
Lux 26

Magenta (pourpre) 101
Masque, tube à 61
Matrice 78, 99
Mélange additif 8
Mélange soustractif 4
Millimicron (mμ) 2
Miroir dichroïque 33
Miroirs à transmission partielle . 27, 33
Modulateur compensé 88
Modulation en quadrature . . . 86, 122

Nanomètre (nm = mμ) 2
Nit (= cd/m^2) 25
N.T.S.C. (National Television System Committee) 61
Nuance d'une couleur 20, 85

P.A.L., système 125
Phases de couleur 104
Plumbicon 45
Pourpres 17
Préaccentuation 122
Projection, système de 73
Puissance radiante 12, 14
Pureté des couleurs 67

R.C.A. (Radio Corporation of America) 58
Répartition des fréquences 80
Réseau matriciel 78, 99

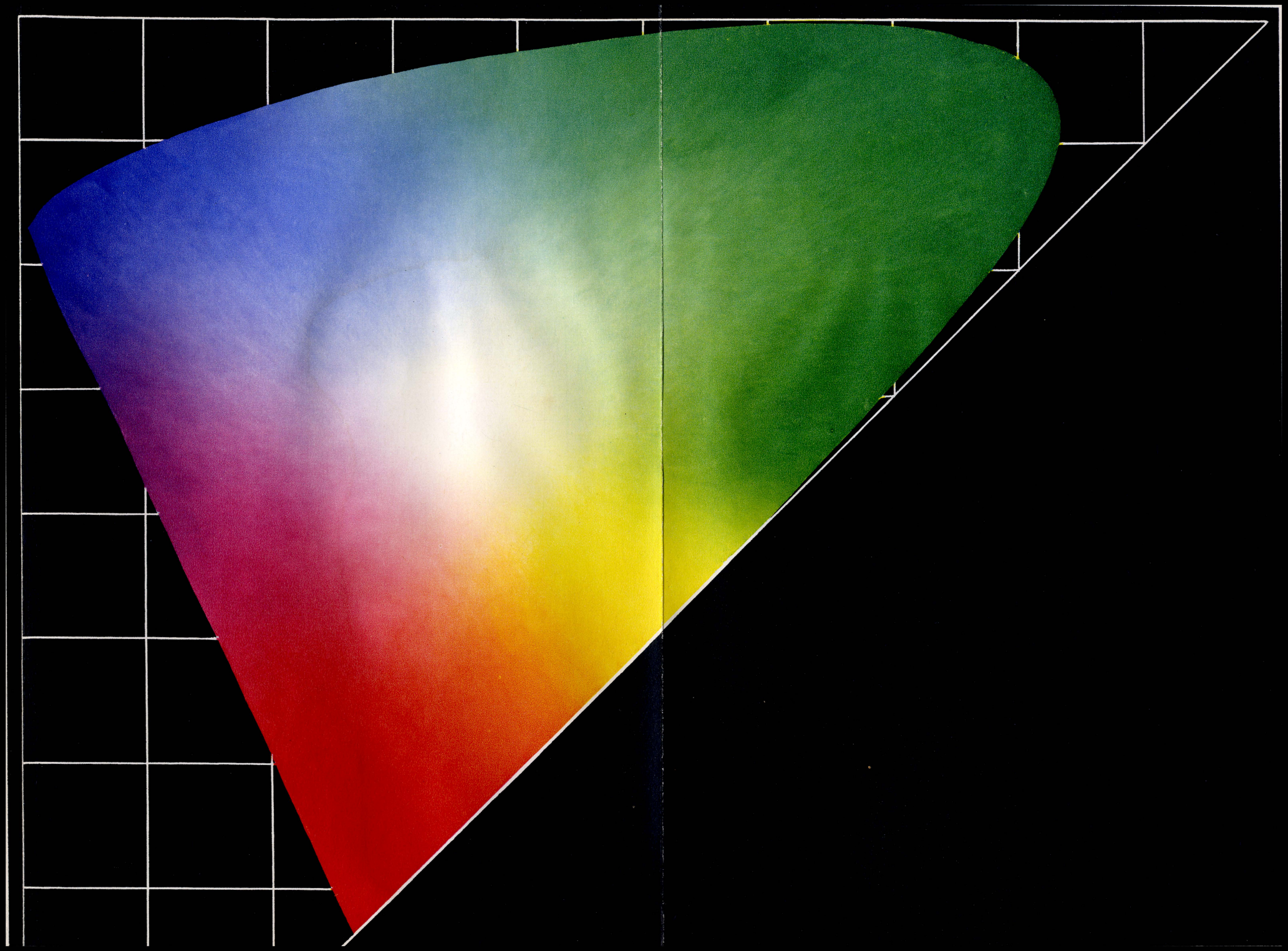
Saturation d'une couleur 3, 20, 85
Secam, système 115
Sensation de brillance 21, 83
Shadow-mask tube 61
Signal couleurs composite 55
Signal de chrominance 76, 85, 102
Signal de luminance 76, 78, 102
Signal – I 87, 98
Signal – Q 87 98
Signal repére 119
Signal – Y 76, 102
Sous-porteuse 127
Sous-porteuse chromatique . . . 80, 102
Spectre des ondes électromagnétiques . 2
Stilb (sb) 25
Stimulus trichromatique 16
Superposition des images 50
Système Eidophore 75
Système optique auxiliaire 41
Système de Schmidt 74
Système à séquence 56, 117
Système séquentiel à ligne 60
Système séquentiel aux points 60
Système simultané 59

Théorie corpusculaire 1
Tirage mécanique 40
Tirage optique 40
Triangle de couleurs 16

U.E.R. (Union Européenne de Radio-diffusion: angl; E.B.U.) 115

x, y, coordonnées 16
X, Y, Z, coordonnées 16

Y – signal 76, 102



LA TELEVISION EN COULEURS

SANS MATHEMATIQUES

Ce livre vient combler une lacune qui existait dans la littérature spécialisée. Son but est de décrire de façon détaillée les théories fondamentales de la télévision en couleurs et de rendre compréhensibles et familières à un large public les problèmes qui se posent dans la pratique. Sans négliger aucun aspect intéressant, c'est en fait un compte-rendu scientifique rédigé d'une manière claire laissant de côté tout ce qui n'est pas essentiel.

«La télévision en couleurs» s'adresse principalement aux techniciens de radio et télévision, aux étudiants suivant des cours de technologie, et à tous ceux qui dans la technique ou dans le commerce - ou même comme hobby - sont intéressés par la télévision.

La lecture de ce livre ne requiert pas de connaissances spéciales de mathématique ou de physique; seule est nécessaire la compréhension des bases de la télévision monochrome.